

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra energetiky

**Typová olejová tlumivka VN - modelová analýza oteplení**  
**Types HV oil reactor - Thermal Simulation**

**2009 / 2010**

**Bc. Milan Víšek**

zadání

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 7. 5. 2010

.....

Chtěl bych na tomto místě poděkovat svému vedoucímu panu ing. Martinu Markovi Ph.D za cenné informace a za pomoc při zpracování mé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval ing. Tomáši Blejchařovi Ph.D za pomoc a rady s praktickým řešením.

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá vysokonapětovou tlumivkou a především principy jejího sdílení tepla. Tlumivky jsou nedílnou součástí energetických systémů, využívají se jako vyhlazovací, zhášecí nebo kompenzační. Sdílení tepla lze rozdělit na 3 základní druhy, a to vedení, proudění a sálání. Vždy se jedná o určitou kombinaci těchto typů. Při průtoku proudu se vodič ohřívá vlivem Joulových ztrát, proto je důležité teplo z prostoru cívky odvádět.

V diplomové práci se zabývám teplotní simulací při průchodu elektrického proudu tlumivkou a prouděním transformátorového oleje, jakožto chladiva. Simulace je provedena v softwaru ANSYS / CFX.

## **Klíčová slova**

Tlumivka, transformátorový olej, vedení, proudění, sálání, síť

## **Abstract**

This thesis deals with high-voltage reactor and above all by principles of heat transfer. The reactors are an integral part of the energy systems and are used as smoothing, quenching or compensational. The heat transfer can be divided into 3 basic types, namely conduction, convection and radiation. Always it is a certain combination of these types. At flow of current the line wire is heated influence joule's losses, that's why it is important to lead away heat from the space of coil.

In my thesis I deal with thermal simulation in passage the electric current by reactor and streaming transformer oil, as a coolant. Simulation is performed in software ANSYS/CFX.

## **Key Words**

Reactor, transformer oil, conduction, convection, radiation, meshes

## Seznam vybraných symbolů a zkratek

Značka	Název	Jednotka
I	elektrický proud	(A)
J	proudová hustota	(A·m <sup>-2</sup> )
L	indukčnost	(H)
P	povrch vodiče	(m <sup>2</sup> )
Q	teplo	(J)
R	elektrický odpor	(Ω)
S	průřez vodiče	(m <sup>2</sup> )
U	elektrické napětí	(V)
V	objem	(m <sup>3</sup> )
c	měrná tepelná kapacita	(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
l	délka vodiče	(m)
q	tepelný tok	(W·m <sup>-2</sup> )
t	čas	(s)
α	součinitel přestupu tepla	(W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )
Φ	tepelný výkon	(W)
η	dynamická viskozita	(Pa·s)
θ	teplota	(K)
λ	součinitel tepelné vodivosti	(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
ν	kinetická viskozita	(m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )
ρ	hustota	(kg·m <sup>-3</sup> )
ρ <sub>0</sub>	měrný elektrický odpor	(W·m)
τ	časová konstanta	(s)

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Cívky .....</b>	<b>3</b>
2.1	Dělení cívek .....	3
2.2	Vlastnosti .....	4
2.3	Provedení cívek.....	4
2.3.1	Cívky pro transformátory .....	4
2.3.2	Cívky pro tlumivky .....	5
<b>3</b>	<b>Tlumivky .....</b>	<b>6</b>
3.1	Typy tlumivek .....	6
3.2	Dodávané tlumivky .....	6
3.2.1	Společnost ABB, s.r.o. ....	7
3.2.2	Společnost EGE, s.r.o. ....	8
3.2.3	Společnost Siemens, s.r.o. ....	9
<b>4</b>	<b>Způsoby sdílení tepla .....</b>	<b>10</b>
4.1	Sdílení tepla vedením (kondukce).....	10
4.1.1	Teplotní pole .....	10
4.1.2	Izotermické plochy a izotermy .....	11
4.1.3	Gradient teploty .....	11
4.1.4	Fourierův zákon.....	11
4.1.5	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ .....	12
4.1.6	Diferenciální rovnice vedení tepla .....	12
4.2	Sdílení tepla prouděním (konvekce) .....	14
4.2.1	Přestup tepla .....	14
4.2.2	Diferenciální rovnice sdílení tepla konvekcí .....	15
4.3	Sdílení tepla sáláním (radiace) .....	15
4.3.1	Základní pojmy sdílení tepla sáláním.....	16
4.3.2	Kirchhoffův zákon.....	16
4.3.3	Stefan – Boltzmannův zákon.....	17
4.3.4	Wienův zákon.....	17
4.3.5	Planckův zákon .....	17
<b>5</b>	<b>Tepelné poměry proudovodných drah .....</b>	<b>18</b>
5.1	Dlouhodobé oteplení .....	18
5.1.1	Oteplení při trvalém chodu.....	18
5.1.2	Oteplení při přerušovaném chodu .....	20
5.2	Krátkodobé oteplení .....	21
5.3	Ochlazování .....	21

5.4	Druhy chladiv.....	22
5.5	Transformátorový olej.....	22
5.5.1	Parametry transformátorových olejů.....	23
5.5.2	Stárnutí oleje .....	24
5.5.3	Čištění, filtrace a regenerace transformátorových olejů.....	25
<b>6</b>	<b>Vlastní řešení – Oteplení typové tlumivky .....</b>	<b>26</b>
6.1	Shrnutí provedení řešené tlumivky .....	27
6.1.1	Princip softwarového řešení .....	28
6.2	Analytický výpočet .....	32
6.3	Příprava 3D geometrického modelu.....	34
6.4	Vytvoření výpočetní sítě .....	38
6.5	Definování problému v ANSYS CFX (CFX – Pre).....	40
6.6	Výpočet řešení v ANSYS CFX (CFX – Solver) .....	43
6.7	Vyhodnocení výsledků z ANSYS CFX (CFX – Post).....	44
<b>7</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>58</b>
<b>8</b>	<b>Literatura.....</b>	<b>59</b>
<b>9</b>	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>60</b>



# 1 Úvod

Tlumivky jsou nedílnou součástí energetických systémů, ale najdeme je i v nízkonapěťových stejnosměrných zařízeních jako vyhlazovací členy za usměrňovačem. Účelem jejich použití v energetice je především kompenzování jalové energie, filtrování harmonických vyšších řádů nebo omezení poruchových proudů. Jejich správná funkčnost a životnost, jakož i u výkonových transformátorů, je dána především jejich chlazením. Při průtoku proudu se vodič ohřívá vlivem Joulových ztrát, proto je důležité teplo z prostoru cívky odvádět. Medium může proudit tzv. nucenou konvekcí nebo přirozenou konvekcí. U nás nalezneme tlumivky chlazené především vzduchem nebo olejem.

Diplomová práce se zabývá vysokonapěťovou olejovou tlumivkou, a především principy jejího chlazení. Jedná se o vyráběnou jednofázovou tlumivku. Tlumivka má několik odboček pro různé hodnoty proudu a hladina napětí je 11,55 kV. Pro účel modelování bude tlumivka navržena z profilovaného vodiče. Mezi vrstvami vinutí je kanál pro proudící transformátorový olej.

V první kapitole představím cívky jako takové, jejich dělení a vlastnosti. Cívky představují nedílnou součást elektrických zařízení a magnetických obvodů. Uplatnění nachází jak ve vysokonapěťové technice (vyhlazovací cívky, točivé i netočivé stroje, apod.) tak i v obvodech nízkého napětí, nebo ve vysokofrekvenční technice (např. filtry, vyhybky reproduktorů apod.). Dále pak představím tlumivky a jejich dělení jak ho udává norma. Součástí kapitoly jsou příklady tlumivek dodávaných na trh.

Čtvrtá kapitola popisuje obecné principy sdílení tepla, tzn. kondukce neboli vedení se uplatňuje nejvíce v pevných tělesech, konvekce neboli proudění je spojeno s kapalinami a plyny a radiací neboli zářením se předává teplo v podobě elektromagnetických vln. Tyto způsoby sdílení tepla v přírodě nikdy neběží samostatně, ale jsou vždy kombinované. V mém případě je bude jednat o předávání tepla z pevného tělesa (vinutí tlumivky) do chladicího média (transformátorový olej).

Pátá kapitola popisuje vznik tepla v elektrických součástkách. Velký vliv na teplotu má velikost protékajícího proudu a doba trvání průchodu proudu, např. krátkodobý nebo dlouhodobý chod. Ztráty vznikající ve vodiči jsou přímoúměrné kvadrátu proudu a elektrického odporu. Jako chladicí média se nejvíce používají vzduch a olej. Voda je v některých případech nevhodná, protože i při malém znečištění se stává vodivou a v důsledku vířivých proudů se rozkládá na vodík

a kyslík. V práci je také stručné představení transformátorových olejů, jeho určující parametry apod. Vlastnosti transformátorových olejů dnes velkou měrou ovlivňují cenu a životnost celého zařízení.

Úkolem práce je teplotní analýza typové olejové tlumivky. Řešení se bude skládat z několika částí. Tuto analýzu budu provádět v simulačním výpočetním softwaru ANSYS / CFX. V práci se budu zabývat návrhem 3D modelu, tvorbou výpočetní sítě a vlastní teplotní analýzou vysokonapěťové tlumivky.

## 2 Cívky

Cívky tvoří nedílnou součást nejen magnetických obvodů, ale nalezneme je v celé řadě dalších aplikací, jako jsou například filtry, laděné obvody apod. U cívek stejnosměrně magnetovaných obvodů bude zpravidla požadavkem stanovit počet závitů a průřez drátu pro dosažení požadovaného magnetického napětí.

U cívek střídavých obvodů bude zpravidla požadavkem počet závitů potřebný pro realizaci indukčnosti v daném frekvenčním rozsahu při daném činiteli jakosti. Dále existuje ještě řada dalších požadavků, kterým je třeba návrh cívky přizpůsobit, např. klimatické vlivy a teplota. [1]

Cívky s jádry z magnetických materiálů mají v porovnání s cívkami vzduchovými řadu výhod. Především mají menší rozměry a indukčnost dostatečně stálou v širokém rozmezí kmitočtů a teplot. Umožňují jednodušší a přesnější nastavení hodnoty indukčnosti. Pro jádra cívek používají převážně ferity. [2]

### 2.1 Dělení cívek

Cívky lze rozdělit dle tvaru na:

- Solenoid - velmi dlouhá cívka
- Toroid - cívka stočená do kruhu

nebo dle druhu na cívku:

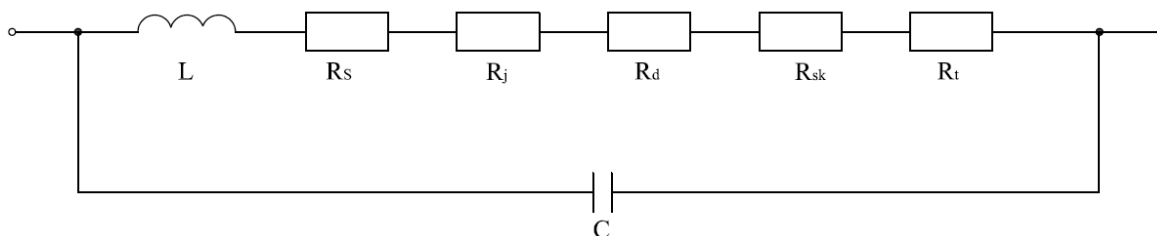
- Vzduchovou
- S železným jádrem
- Bez železného jádra

Cívky se dále rozdělují podle frekvence střídavého proudu:

- Nízkofrekvenční cívky:
  - frekvence 50 Hz jejich použití pro transformátory a tlumivky
  - frekvence do 20 kHz jejich použití v audiotechnice (vyhybky reproduktorů)
- Vysokofrekvenční cívky:
  - frekvence do 100 MHz, cívky s feromagnetickým jádrem, použití do laděných obvodů, pro mezifrekvenční filtry a vysokofrekvenční oscilátory
  - frekvence do 3 GHz, cívky vzduchové, použití pro velmi krátké a ultrakrátké vlny [2]

## 2.2 Vlastnosti

Náhradní schéma cívky, které popisuje parametry cívky je na obr. 2.1:



Obr. 2.1 Náhradní schéma cívky

- $L$  – vlastní indukčnost
- $R_s$  – odpor stejnosměrné složky
- $R_j$  – ztráty v jádře, způsobeny hysterezí a vířivými proudy
- $R_d$  – ztráty dielektrické
- $R_{sk}$  – vliv skin efektu
- $R_t$  – ztráty tepelné
- $C$  – parazitní kapacita mezi závitů

V mnoha případech můžeme však za náhradní schéma cívky považovat jen sériovou kombinaci RL. Dalšími parametry cívky jsou

- činitel jakosti  $Q$
- rozsah pracovních teplot
- elektrická pevnost
- zatížitelnost

## 2.3 Provedení cívek

### 2.3.1 Cívky pro transformátory

Kostra:

- Materiál pro kostry cívek pro síťové transformátory je papír lisovaný s různými druhy umělých pryskyřic, např.: fenol-formaldehydovou pryskyřicí (PERTINAX)
- Velikost a tvar kostry je dán požadavky na transformátor, kostry jsou skládány z destiček normovaných rozměrů

- Čela kostry jsou na okrajích děrována v normovaných roztečích, do děr jsou upevněny nýty s pájecími očky pro konce drátů cívek [5]

Jádro:

- Jádro cívky se skládá z transformátorových plechů, které jsou pokryty izolační vrstvou
- Tvar plechů jádra je nejčastěji z EI plechů, ale možností je tvar plechu M, C, Q

### 2.3.2 Cívky pro tlumivky

Tlumivka je cívka určená pro tlumení nechtěných složek proudu. Tlumí střídavou složku stejnosměrného proudu (vyhlazování zvlnění), anebo vysokofrekvenční složku střídavého proudu síťové frekvence (filtrace vysokofrekvenčního proudu).

Proto, aby tlumivka dobře filtrovala střídavý proud, musí mít velkou reaktanci  $X_L = \omega \cdot L$ , a protože kruhový kmitočet  $\omega$  je nízký musí být velká indukčnost  $L$ . Ale aby počet závitů cívky nebyl příliš vysoký, užívá se pro tlumivky cívka s magnetickým jádrem, jehož permeabilita  $\mu = \frac{\Delta B}{\Delta H}$  dostatečně zvýší indukčnost  $L$ . Permeabilita  $\mu$  je závislá na sklonu magnetizační křivky. Sklon křivky je závislý na velikosti stejnosměrného proudu protékajícího tlumivkou, který určuje pracovní bod pro filtrovaný střídavý proud. Když je proud příliš vysoký, dojde k magnetickému nasycení a poměr je malý, tzn. indukčnost tlumivky je nedostatečná. Cívky pro nízkofrekvenční tlumivky jsou ve výrobě stejné jako pro síťový transformátor, tedy:

- Kostra cívky je ze stejného materiálu jako u transformátoru
- Cívky mají pouze jedno vinutí
- Jádro má vzduchovou mezeru, kterou je dosažen poměr mezi dostatečně vysokou indukčností a snesitelným zkreslením napětí.

Vysokofrekvenční tlumivka je určena pro odfiltrování vysokofrekvenční složky proudu od nízkofrekvenční složky střídavého proudu.

Použití pro odrušovací obvody domácích spotřebičů, ve kterých v provozu dochází ke vzniku vysokofrekvenční parazitní složky proudu. Takováto tlumivka má několik závitů smaltovaného měděného drátu, který je bez jádra, nebo je navinut na feritovém jádře.

## 3 Tlumivky

### 3.1 Typy tlumivek

Dle ČSN EN 60076-6 jsou tlumivky rozdělovány takto:

- Kompenzační tlumivka je tlumivka zapojená mezi fázemi, nebo mezi fází a zemí za účelem kompenzace kapacitních proudů v energetickém systému.
- Tlumivka k omezení proudu je tlumivka zapojená v sérii k omezení procházejícího poruchového proudu.
- Tlumivka k omezení proudu mezi nulovým bodem a zemí je určena k omezení fázového proudu při zemních spojeních na požadovanou hodnotu.
- Tlumivka k řízení toku výkonu je zapojena do série v energetickém systému pro řízení toku výkonu.
- Spouštěcí tlumivka motoru je určena k omezení zapínacího proudu při rozběhu motoru.
- Tlumicí tlumivka je v sérii s kompenzačními kondenzátory k omezení proudu při nabíjení kondenzátoru, k omezení vypínacího proudu při blízkých poruchách nebo při spínání přilehlých kondenzátorů, nebo za účelem vyloučení rezonance.
- Tlumivka filtrační je v sérii nebo i paralelně s kondenzátory za účelem zmenšení nebo zamezení harmonických nebo řídicích signálů s kmitočty do 10 kHz (zamezení zvlnění).
- Zhášecí tlumivka je mezi nulovým bodem energetického systému a zemí ke kompenzaci kapacitního zemního proudu při jednofázovém zemním spojení.
- Vyhlažovací tlumivka je zapojena do série ve stejnosměrném obvodu k omezení střídavých proudů a přechodných nadproudů.

### 3.2 Dodávané tlumivky

Na náš trh dodávají tlumivky pro vn a vvn techniku především společnosti ABB, s.r.o., EGE, s.r.o., Siemens, s.r.o.

### 3.2.1 Společnost ABB, s.r.o.

#### Stejnoseměrné vyhlazovací tlumivky

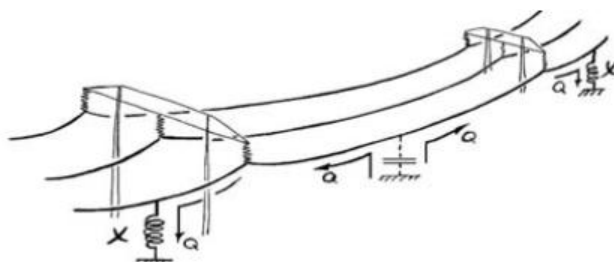
Cílem stejnosměrné tlumivky je snížení zvlnění stejnosměrného proudu. Stejnoseměrný proud vycházející z usměrňovače má nasuperponované vyšší harmonické složky. Tlumivka je zapojena v sérii s usměrňovačem. Principem je poskytnutí vysoké impedance harmonickým složkám proudu, tzn. vyhladit procházející proud. ABB nabízí vyhlazovací tlumivky ponořené v oleji pro aplikaci ve vn soustavě ABB dodává několik různých velikostí tlumivky pro přenos vysokých výkonů. [9]

#### Síťové kompenzační tlumivky

Použití kompenzační tlumivky zvyšuje impedanci v uzlu transformátoru. Během jednofázových poruch tlumivka omezuje proud. Ztráty v tlumivce nemají ekonomický význam. Proudová hustota ve vinutí je navržena tak, aby byla tlumivka schopna odolávat mechanickému tlaku při průchodu poruchového (krátkodobého) proudu. Dodávané tlumivky mohou být suché nebo olejové.

#### Paralelní (zkratové) tlumivky

Zkratové tlumivky jsou důležitou součástí pro funkčnost přenosových soustav vysokého napětí. ABB dodává zkratové tlumivky pro přímé připojení k vysokonapětovým soustavám v závislosti na zatížení vedení a jalovém výkonu (obr. 3.1). Je vhodná jak pro spínaný, tak pro trvalý chod (obr. 3.2).



Obr. 3.1 Tlumivka (X) spotřebovává přebytečnou jalovou energii (Q) ze sítě



Obr. 3.2 Trvalý nebo přerušovaný chod

Tlumivka na elektrickém vedení zabraňuje neřízenému nárůstu napětí, zejména pak na málo zatížených linkách. Robustní konstrukce a jednoduchý design dělá z paralelní tlumivky ekonomicky nejefektivnější kompenzaci kapacitních proudů (obr.3.3). Koncept tlumivky je založený na nízkých ztrátách s celkově nízkou hmotností. Koncept byl představen v polovině šedesátých let. V dnešní době ABB již lépe zvládá provozní parametry, jako jsou např. hluk a vibrace. [9]



Obr. 3.3 Zkratová tlumivka pro přenosovou síť 400kV, 150 Mvar (lit. [9])

### 3.2.2 Společnost EGE, s.r.o.

#### Zhášecí tlumivky zemního spojení (Petersenovy cívky)

Zhášecí tlumivky se připojují k uzlu distribuční sítě, slouží ke kompenzaci kapacitních proudů při zemním spojení v elektrické síti. Tlumivky vyráběné firmou EGE jsou plynule přeladitelné. Typové řady tlumivek splňují základní technické požadavky na výrobky, které obsahuje již zmíněná norma ČSN EN 60076-6. Konkrétní provedení zhášecí tlumivky je přizpůsobeno specifickým požadavkům zákazníka.

Firma EGE dodává i specifické provedení zhášecí tlumivky tzv. kombinovanou tlumivku s integrovaným zemním transformátorem. [10]

Dodávané tlumivky pro:	jmenovité výkony 125 kVA až 12 700 kVA
	jmenovitá napětí sítí 6 kV až 110 kV
	krátkodobý i trvalý druh provozu



Dle přání zákazníka nabízí EGE, s.r.o. další výrobky:

- Ukazatel  $U_0$  pro zobrazení velikosti napětí  $U_0$  na měřicím vinutí zhášecí tlumivky (pro vyhledávání rezonančního maxima napětí  $U_0$ )
- Ukazatel nastavení zhášecí tlumivky (zobrazuje hodnotu proudu, na kterou je zhášecí tlumivka nastavena)



Obr. 3.4 Zhášecí tlumivky od společnosti EGE, s.r.o. (lit. [10])

### 3.2.3 Společnost Siemens, s.r.o.

Kompenzační tlumivky Siemens pro sítě vn a vvn zlepšují stabilitu přenosu energie a hospodárnost přenosové soustavy. Siemens patří k největším světovým dodavatelům kompenzačních tlumivek. Tlumivky jsou i pro jednotky s napětím až 735 kV a výkonem až 250 Mvar,

## 4 Způsoby sdílení tepla

V technické praxi, ale i v celé přírodě velmi často probíhá sdílení tepla třemi základními způsoby, zejména jejich kombinacemi.

Vedení tepla (kondukce) se vyskytuje zejména u pevných látek, pokud u nich existuje rozdíl teplot. Vedení tepla je způsobeno pohybem mikročástic (molekul a atomů), jejichž kmitáním se přenáší energie z míst s vyšší teplotou k místům s nižší teplotou.

Proudění tepla (konvekce) je možná pouze u kapalin a plynů. Přenos tepla se uskutečňuje přemísťováním mikročástic, tzn. přenos tepla je spjat se samotným přesunem hmoty. Ke sdílení tepla konvekcí dochází při promíchávání teplejších částí tekutiny se studenějšími.

Sálání (radiace) tepla je přenos tepla elektromagnetickým vlněním. Teplo sálajícího tělesa se změní na záření, které se po dopadu na pohlcující těleso přemění opět v teplo. Toto sdílení tepla se projevuje především ve vesmíru. [3]

### 4.1 Sdílení tepla vedením (kondukce)

Je to šíření tepla přímým dotykem jednotlivých těles, resp. jednotlivých částic tělesa mající různé teploty. O čistém vedení tepla mluvíme u pevných těles, ale nalezneme ho i u kapalin a plynů, zejména uvažujeme-li je makroskopicky v klidu. Jsou-li kapaliny a plyny v pohybu, probíhá v nich také sdílení tepla kondukcí, ale převládá zde naprosto vedení tepla konvekcí.

Při řešení otázek vedení tepla se pro praktické využití uvažuje velikost sledovaných částí vždy mnohonásobně větší, než vzdálenost mezi molekulami a atomy v daném tělese. [3]

#### 4.1.1 Teplotní pole

Stavová veličina pro sledování kondukce tepla se nazývá teplota. Teplota ve sledovaném prostředí může být obecně funkcí místa (souřadnicový systém)

$$\vartheta = f(x, y, z) \quad (^\circ\text{C}) \quad (4.1)$$

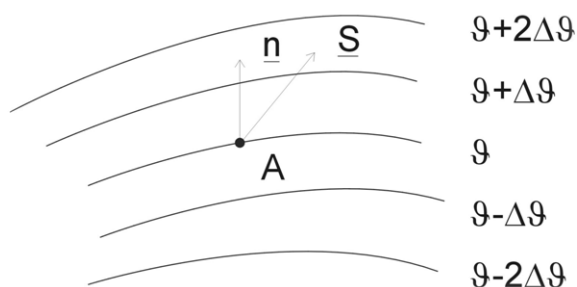
nebo funkcí času

$$\vartheta = f(x, y, z, t) \quad (^\circ\text{C}) \quad (4.2)$$

Rovnice (4.1) a rovnice (4.2) je matematickým vyjádřením teplotního pole. Jak je vidět, teplotní pole může být nezávislé na čase, tzv. stacionární pole, nebo proměnné s časem, tzv. nestacionární pole. A dle počtu souřadnic  $x$ ,  $y$ ,  $z$  může být teplotní pole jednorozměrné, dvourozměrné nebo třírozměrné.

### 4.1.2 Izotermické plochy a izotermy

Geometrická místa o stejné teplotě se nazývají izotermické plochy. Jsou buď uzavřené v daném prostředí, nebo vycházejí na povrch a navzájem se nikdy neprotínají. Libovolná rovina protínající izotermické plochy v křivkách se nazývají izotermy (obr. 4.1).



Obr. 4.1. Izotermy

### 4.1.3 Gradient teploty

Pro šíření tepla je nutný rozdíl teplot, je tedy možné šíření jen ve směrech protínajících izotermické plochy. Největší teplotní spád je v normále k izotermické ploše a matematicky je popsán gradientem teploty

$$\text{grad } \vartheta = \underline{n}_0 \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \quad (K \cdot m^{-1}) \quad (4.3)$$

poměr  $\frac{\partial \vartheta}{\partial n}$  je derivací teploty podle normály  $n$  (skalární hodnota gradientu). Ve smyslu ubývání teploty je hodnota gradientu záporná.

### 4.1.4 Fourierův zákon

Je to závislost mezi teplotním spádem (gradientem) a tepelným tokem

$$dQ = -\lambda \cdot \text{grad } \vartheta \cdot dS \cdot dt \quad (J) \quad (4.4)$$

$dQ$  je množství tepla, které projde elementární plochou  $S$  izotermické plochy za jednotku času  $dt$ . Tok je závislý na fyzikálních vlastnostech prostředí, to je vyjádřeno součinitelem  $\lambda$  a na teplotním spádu tzn.  $\text{grad } \vartheta$

Fourierův zákon lze zapsat ve tvaru hustoty tepelného toku (teplotního příkonu)

$$|q| = -\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \cdot 1 \cdot 1 \quad (W \cdot m^{-2}) \quad (4.5)$$

resp.

$$|q| = -\lambda \cdot \text{grad } \vartheta \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (4.6)$$

Směr vektoru plošné hustoty tepelného toku  $|q|$  je ve směru ubývání teploty, proto se ve vzorci objevuje znaménko mínus.

#### 4.1.5 Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$

Součinitel  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti neboli tepelná konduktivita. Je závislý na fyzikálních vlastnostech látky, na teplotě a tlaku. Převážně se určuje experimentálně na základě měření tepelného toku a teplotního gradientu. U většiny látek má závislost  $\lambda = f(\vartheta)$  lineární charakter:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + b \cdot \Delta\vartheta) \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (4.7)$$

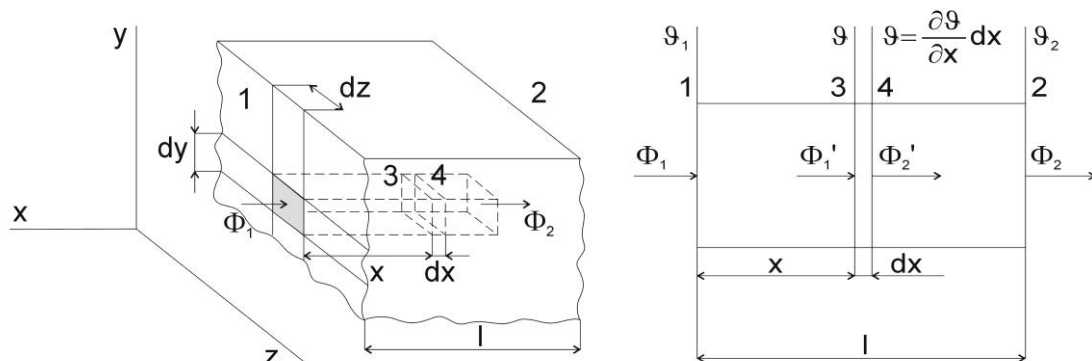
Hodnoty součinitele  $\lambda$  pro plynné látky jsou orientačně v rozsahu  $0,006 \div 0,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , pro kapaliny je to  $0,07 \div 0,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , Pro pevné látky jsou rozdíly podstatně vyšší, pro kovy a slitiny je  $\lambda = 2 \div 416 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , kdežto u tepelně izolačních materiálů (např. stavební) je  $\lambda = 0,023 \div 2,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Materiál	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda \text{ (W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
hliník	210
křemík	150
měď	401
železo	80,2
olej	0,123
vzduch	0,026

Tab. 4.1 Součinitel tepelné vodivosti vybraných materiálů

#### 4.1.6 Diferenciální rovnice vedení tepla

Rovnice pro případ uvedený na (obr. 4.2) je zjednodušena na procházející tok jen ve směru osy  $x$ . Ve směrech osy  $y$  a  $z$  je uvažovaná stěna rozprostřena do nekonečna, tloušťka stěny je  $l$ . Vlevo je prostředí o teplotě  $\vartheta_1$  a vpravo o teplotě  $\vartheta_2$ . Do vytčeného hranolu o základnách  $\Delta y$  a  $\Delta z$  vstupuje tepelný tok  $\Phi_1$  a vystupuje tepelný tok  $\Phi_2$ . Ve vzdálenosti  $X$  je element o rozměrech  $\Delta y \cdot \Delta z \cdot dx$ .



Obr. 4.2 Výpočet procházejícího tepelného toku (lit. [4])

Gradient teploty v místě X je

$$\text{grad } \vartheta = \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \cdot \underline{n} \quad (4.8)$$

A v místě X vstupující tepelný tok je  $\Phi_1'$  roven

$$\Phi_1' = \frac{dQ_1'}{dt} = -\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \cdot \Delta y \cdot \Delta z \quad (4.9)$$

Tepelný tok vystupující z elementu je roven

$$\Phi_2' = \frac{dQ_2'}{dt} = -\lambda \cdot \left( \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \cdot dx \right) \cdot \Delta y \cdot \Delta z \quad (4.10)$$

Rozdíl těchto toků je

$$\Phi_1' - \Phi_2' = \lambda \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \cdot dx \cdot \Delta y \cdot \Delta z \quad (4.11)$$

Diferenciální rovnice pro tento zjednodušený případ je tedy

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \quad (4.12)$$

Součinitel tepelné vodivosti  $\alpha$  zahrnuje fyzikální materiálové konstanty jako je měrná vodivost, měrná hmotnost a měrné teplo. [4]

V obecném případě by místo  $\Phi_1'$  vstupoval do elementu obecně orientovaný vektor tepelného toku, který můžeme rozdělit ve směru souřadných os. Diferenciální rovnice vedení tepla v obecném tvaru je:

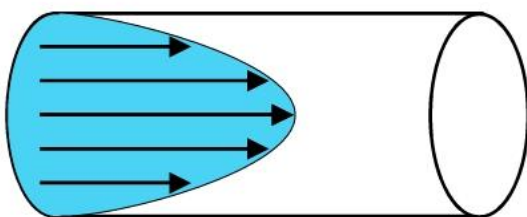
$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) \quad (4.13)$$

## 4.2 Sdílení tepla prouděním (konvekce)

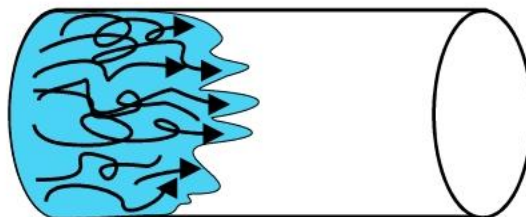
Toto sdílení tepla se nejvíce objevuje u kapalin a plynů. Uskutečňuje se při proudění mikročástic tekutiny z oblasti jedné teploty do oblasti s jinou teplotou. Konvekce je tedy spojena i s přesunem hmoty.

U konvekce velmi záleží na druhu proudění tekutiny. Proudění může být přirozené (volné) nebo nucené. Přirozené proudění vzniká rozdílnou hustotou látek ohřátých na různé teploty. Naproti tomu nucené proudění vzniká při působení vnějších sil (kompresory, čerpadla). Při časté kombinaci obou druhů proudění je vliv přirozeného zanedbatelný.

Z hlediska tvaru proudění lze proudění rozlišit na laminární a turbulentní. Při laminárním proudění se částice tekutiny pohybují navzájem rovnoběžně a nenastává k mísení uvnitř tekutiny (obr. 4.3.). U turbulentního proudění je pohyb částic neuspořádaný a dochází k mísení tekutin, toto je intenzivnější přenos tepla. (obr. 4.4)



Obr. 4.3 Laminární proudění



Obr. 4.4 Turbulentní proudění

Fyzikální vlastnosti tekutin hrají důležitou roli při konvekčním sdílení tepla. Je to zejména hustota  $\rho$  a také součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ . Ale také se zde objevuje měrná tepelná kapacita  $c$ . Na rozdíl od vedení tepla v pevných látkách zde má velký význam viskozita.

### 4.2.1 Přestup tepla

V technické praxi nás především zajímá přenos tepla konvekcí mezi tekutinou a povrchem obtékaného (protékaného) tělesa, tento přenos se nazývá přestup tepla. Je složitou funkcí mnoha veličin. Pro přehlednost výpočtu se využívá Newtonova vztahu:

$$q = \alpha \cdot (\vartheta_p - \vartheta_f) \quad (W \cdot m^{-2}) \quad (4.14)$$

Rozdíl teplot je rozdíl mezi teplotou povrchu tělesa  $\vartheta_p$  a teplotou tekutiny  $\vartheta_f$ . Součinitel přestupu tepla  $\alpha$  v sobě soustřeďuje všechnu složitost výpočtu. Způsob jeho určení poté patří k hlavním úkolům při výpočtech přestupu tepla.

#### 4.2.2 Diferenciální rovnice sdílení tepla konvekcí

Rovnice přestupu tepla u povrchu tělesa. I když tekutina proudí, tak se u stěny tělesa nachází tenká vrstva tekutiny, která je v klidu. Pro ni použijeme Fourierův zákon

$$q = -\lambda_f \cdot \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial n}\right)_{n \rightarrow 0} \quad (W \cdot m^{-2}) \quad (4.15)$$

Zároveň také platí Newtonův zákon (rovnice 4.14). Jejich sloučením dostaneme rovnici:

$$\alpha = -\frac{\lambda_f}{\vartheta_p - \vartheta_f} \cdot \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial n}\right)_{n \rightarrow 0} \quad (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}) \quad (4.16)$$

Dále se ve výpočtu vyskytují diferenciální rovnice vedení tepla, pohybová rovnice Navierovy – Stokesovy pro proudění nestlačitelných kapalin a rovnice kontinuity. K těmto rovnicím se ještě připojují okrajové podmínky. Analytické řešení rovnic je náročné, protože do výpočtů vstupuje mnoho proměnných. V praxi se, až na výjimky, používá vztahů získaných experimentálně. [3]

### 4.3 Sdílení tepla sáláním (radiace)

Sálání neboli radiace tepla je dalším způsobem sdílení tepla. Sálání se vyskytuje v mnoha tepelně fyzikálních případech, zejména u vysokoteplotních jevů. Ale z obecného pohledu, každé těleso, které má větší teplotu, než je absolutní nula, tzn.  $\theta = 0 K$ , vyzařuje energii, ale zároveň ji i pohlcuje.

Tepelné sálání je druhem přenosu tepla pomocí elektromagnetických vln. Elektromagnetické vlny se šíří rychlostí světla. Elektromagnetické záření je charakterizováno svým kmitočtem, resp. vlnovou délkou.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (m) \quad (4.17)$$

Teplo tělesa se mění v elektromagnetické záření, které dopadá na jiné těleso a mění se zpět v teplo. Vlnění má různé délky např. kosmické vlnění  $\lambda = 0,05 \cdot 10^{-6} \mu m$ , světelné viditelné záření  $\lambda = 0,35 \div 0,75 \mu m$  a nejdelší jsou elektromagnetické vlny rozhlasové, ty dosahují až kilometrů. Infračervené záření neboli záření tepelné má vlnové délky v oblasti  $\lambda = 0,8 \div 800 \mu m$ .

Záření dopadající na těleso se obecně rozdělí na tři části, záření, které se odráží, které prochází a které je tělesem pohlceno a přeměněno se v teplo.

$$A + B + C = 1 \quad (4.18)$$

Absolutně černé těleso všechnu dopadající energii pohltí, tedy  $A = 1$ . Naopak absolutně bílé těleso všechnu energii dopadající na jeho povrch odráží, tzn.  $B = 1$ . Pro případ, že  $C = 1$  se jedná o dokonale průzračné těleso.

Sálání těles, na rozdíl od předešlých způsobů sdílení tepla, velice závisí na teplotě. Zvýšení teploty tělesa způsobí zvýšení jeho vnitřní energie a tím se zvýší i jeho vyzařovaná energie. S rostoucí teplotou se mění též spektrální složení vlnění (zvýšení intenzity záření na kratších vlnových délkách).

#### 4.3.1 Základní pojmy sdílení tepla sáláním

Každé těleso s teplotou vyšší než  $0\text{ K}$  vyzařuje do okolí určité množství energie. Celkové množství energie vyzařené do polokulového prostoru z povrchu tělesa ve všech vlnových délkách nazýváme zářivou energií  $Q_e$ .

Výkon (zářivý tok) přenášený touto zářivou energií je

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (W) \quad (4.19)$$

Je-li zářivý tok tvořen jen určitou vlnovou délkou  $\lambda$ , je tento tok nazýván: spektrální hustota zářivého toku  $\Phi_{e\lambda}$ , tzn.

$$\Phi_{e\lambda} = \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \quad (W \cdot m^{-1}) \quad (4.20)$$

resp.

$$\Phi_e = \int_0^\infty \Phi_{e\lambda} \cdot d\lambda \quad (W) \quad (4.21)$$

Dopadající zářivý tok  $\Phi_e$  se dělí na výše zmíněné tři části, tzn.

$$\Phi_e = \Phi_A + \Phi_B + \Phi_C \quad (W) \quad (4.22)$$

#### 4.3.2 Kirchhoffův zákon

Poměr úhrnné zářivosti šedého povrchu  $E_s$  a relativní pohltivosti  $A_s$  závisí pouze na teplotě, nikoli však na barvě povrchu. Vztah pro úhrnnou zářivost je:

$$\frac{E_s}{A_s} = E_c \quad (4.23)$$

a pro spektrální zářivost (závislost na teplotě a vlnové délce) platí

$$\frac{E_{\lambda s}}{A_{\lambda s}} = E_{\lambda c} \quad (4.24)$$



### 4.3.3 Stefan – Boltzmannův zákon

Na základě měření odvodil Stefan zákon, že úhrnná zářivost dokonale černého tělesa je úměrná Stefanově – Boltzmannově konstantě  $\sigma_{\zeta} = 5,77 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  a čtvrté mocnině teploty:

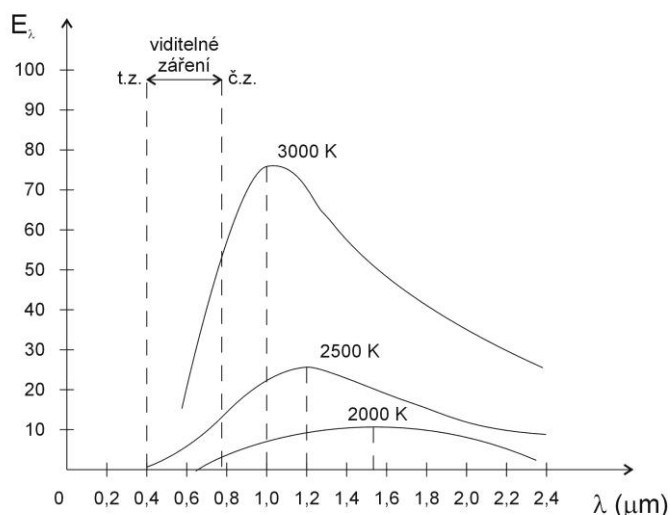
$$E_{\zeta} = \sigma_{\zeta} \cdot \Theta^4 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (4.25)$$

### 4.3.4 Wienův zákon

Wien odvodil závislost mezi vlnovou délkou  $\lambda$  a spektrálním zářením  $E_{\lambda}$

$$\lambda_{\max} = \frac{2,892 \cdot 10^{-3} \cdot E_{\zeta}}{\Theta} \quad (m) \quad (4.26)$$

ze vzorce je vidět, že spektrální záření je za dané teploty nejvyšší pro vlnovou délku  $\lambda_{\max}$ . To také znamená, že při vyšších teplotách se maximum záření posunuje ke straně kratších vlnových délek, jedna se o tzv. Wienův posunovací zákon.



Obr. 4.4 Wienův posunovací zákon (lit. [4])

### 4.3.5 Planckův zákon

Planck učinil předpoklad, že záření je tokem elementárních kvant  $\varepsilon$ , které jsou úměrné kmitočtu  $f$  daného záření a Planckově konstantě  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

$$\varepsilon = h \cdot f \quad (4.27)$$

## 5 Tepelné poměry proudovodných drah

Elektrická energie se mění v tepelnou podle Joulova zákona. Prochází-li vodičem o odporu  $R$  elektrický proud  $I$ , vodič se ohřívá vlivem tepelných ztrát, definovaných vztahem

$$dQ = R \cdot I^2 \quad (W) \quad (5.1)$$

Jelikož ztráty jsou definovány v každém časovém okamžiku, tak po integraci tohoto vztahu dostáváme

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad (J) \quad (5.2)$$

Odpor  $R$  je definován vztahem

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (\Omega) \quad (5.3)$$

a je u většiny materiálů závislý na teplotě

$$R_{\vartheta} = R \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) \quad (\Omega) \quad (5.4)$$

$\rho$  je měrný odpor materiálu, který mají kovy velice malý, např. měď má  $\rho = \frac{1}{56} (\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1})$  u nekovů dosahuje  $\rho$  až několika tisíc. Teplotní součinitel  $\alpha$  je pro většinu kovů kladný, tzn. s rostoucí teplotou roste i odpor. Tento činitel nebývá konstantní, ale je závislý na teplotě.

### 5.1 Dlouhodobé oteplení

#### 5.1.1 Oteplení při trvalém chodu

Vzniklé teplo, popisující rovnice (5.1) se dělí na dvě části, ohřátí vlastního vodiče a sdílení tepla do okolí. Rovnice se tedy rozepíše

$$R \cdot I^2 \cdot dt = \alpha_0 \cdot P \cdot \Delta\vartheta \cdot dt + c \cdot V \cdot d\vartheta \quad (5.5)$$

lze jí také přepsat do tvaru:

$$q \cdot V \cdot dt - \alpha_0 \cdot P \cdot \Delta\vartheta \cdot dt = c \cdot V \cdot d\vartheta \quad (5.6)$$

rovnice (5.6) se řeší separací proměnných

$$dt = \frac{d\vartheta}{\frac{q}{c} - \frac{\alpha_0 \cdot P}{c \cdot V} \cdot \Delta\vartheta} \quad (5.7)$$

a tedy

$$t = -\frac{c \cdot V}{\alpha_0 \cdot P} \cdot \ln \left( \frac{q}{c} - \frac{\alpha_0 \cdot P}{c \cdot V} \cdot \Delta\vartheta \right) + C_1 \quad (s) \quad (5.8)$$

Integrační konstantu  $C_1$  stanovíme z počátečních podmínek, tzn. v čase  $t = 0$  je teplota  $\vartheta = 0$ , tedy

$$C_1 = \frac{c \cdot V}{\alpha_0 \cdot P} \cdot \ln \frac{q}{c} \quad (5.9)$$

a dosazením do rovnice (5.8) dostaneme

$$t = -\frac{c \cdot V}{\alpha_0 \cdot P} \cdot \ln \left( 1 - \frac{\alpha_0 \cdot P}{q \cdot V} \cdot \Delta \vartheta \right) \quad (s) \quad (5.10)$$

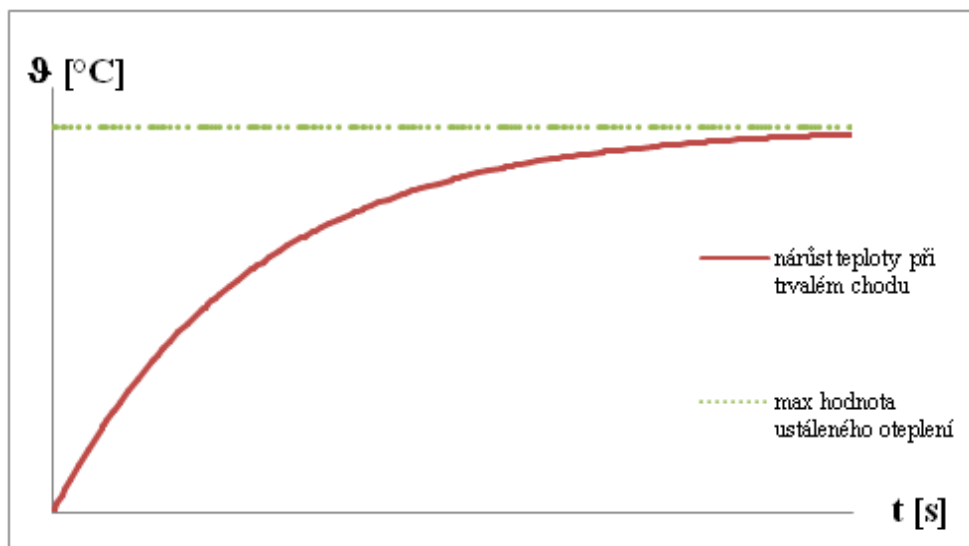
a odlogaritmováním dostáváme rovnici pro okamžitou hodnotu oteplení:

$$\Delta \vartheta = \frac{q \cdot V}{\alpha_0 \cdot P} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\alpha_0 \cdot P}{c \cdot V} \cdot t} \right) \quad (^\circ C) \quad (5.11)$$

Zde je vidět hodnota maximálního ustáleného oteplení  $\Delta \vartheta_{max} = \frac{q \cdot V}{\alpha_0 \cdot P}$ , dále zavádíme časovou konstantu  $\tau = \frac{c \cdot V}{\alpha_0 \cdot P}$ , toto je také hodnota času, za který by těleso dosáhlo ustáleného oteplení, kdyby neodvádělo žádné teplo do okolí. Rovnice má potom tvar.

$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_{max} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (^\circ C) \quad (5.12)$$

Jak je patrné z (5.12) oteplení má exponenciální charakter. Rychlost nárůstu určuje časová konstanta  $\tau$ . Na obr 5.1. je oteplovací křivka.



Obr. 5.1 Graf oteplovací křivky

Ustálený stav je stav, kdy nastává teplotní rovnováha a teplo vzniklé procházejícím proudem se předává do okolí

$$R \cdot I^2 = \alpha_0 \cdot P \cdot \Delta \vartheta_{max} \quad (W) \quad (5.13)$$

Velice důležité je dbát při návrhu na to, že vodič sám snese vyšší teplotní zatížení, ale limitující je tepelná odolnost izolantu.

### 5.1.2 Oteplení při přerušovaném chodu

Zařízení pracující tam, kde je proud přerušovaný a obvodem neprochází elektrický proud, předává své teplo (energii) do okolí a jeho teplota klesá. Z rovnice (5.5) první člen vypadne, jelikož se proud rovná 0 a rovnice má podobu

$$0 = \alpha_0 \cdot P \cdot \Delta\vartheta \cdot dt + c \cdot V \cdot d\vartheta \quad (5.14)$$

po separaci proměnných

$$dt = -\frac{c \cdot V}{\alpha_0 \cdot P \cdot \Delta\vartheta} \cdot d\vartheta \quad (5.15)$$

a po integraci dostaneme

$$t = -\frac{c \cdot V}{\alpha_0 \cdot P} \cdot \ln \Delta\vartheta + C_2 \quad (s) \quad (5.16)$$

konstantu  $C_2$  dostaneme z počátečních podmínek  $t = 0$  a  $\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{max}$

$$C_2 = \frac{c \cdot V}{\alpha_0 \cdot P} \cdot \ln \Delta\vartheta_{max} \quad (5.17)$$

poté má rovnice tvar

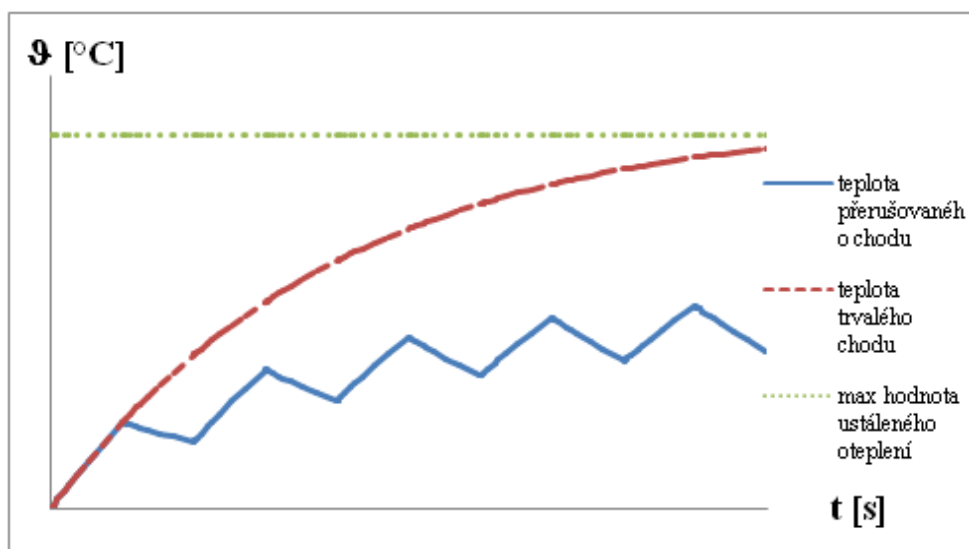
$$t = -\frac{c \cdot V}{\alpha_0 \cdot P} \cdot \ln \frac{\Delta\vartheta}{\Delta\vartheta_{max}} \quad (s) \quad (5.18)$$

po úpravě bude mít rovnice pro oteplení resp. pro ochlazení podobu

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (^\circ C) \quad (5.19)$$

Časová konstanta  $\tau = \frac{c \cdot V}{\alpha_0 \cdot P}$  zůstává stejná jako v předchozím případě.

Jak je vidět na obr 5.2 zařízení se zpravidla nedostává až na hranici teplot pro trvalý chod. Je to hlavně z ekonomických důvodů



Obr. 5.2 Graf oteplení při přerušovaném chodu

## 5.2 Krátkodobé oteplení

Při průchodu proudu vodičem (zařízením) za dobu kratší než je  $0,2 \cdot \tau$  můžeme zanedbat odvod tepla do okolí, tzn., že těleso nesdílí své teplo do okolí, ale shromažďuje ho a zvyšuje svou teplotu.

Rovnice (5.5) se redukuje na:

$$R \cdot I^2 \cdot dt = c \cdot V \cdot d\vartheta \quad (5.20)$$

Po integraci dostáváme rovnici pro krátkodobé oteplení za dobu  $t_{kd}$

$$\Delta\vartheta_{kd} = \left( \frac{R \cdot I^2}{c \cdot V} \right) \cdot t_{kd} \quad (^\circ\text{C}) \quad (5.21)$$

Ze vztahu pro výpočet odporu lze vztah přepsat

$$\Delta\vartheta_{kd} = \left( \frac{\rho \cdot l \cdot I^2}{c \cdot l \cdot S^2} \right) \cdot t_{kd} \quad (^\circ\text{C}) \quad (5.22)$$

Ale protože se jedná o krátkodobá oteplení, zejména tedy při přechodných dějích a zkratech, velikost proudu se mění a vzorec se upraví tak, aby tyto změny respektoval, tedy

$$I^2 \cdot t_{kd} = \int_0^{t_{kd}} i^2 \cdot dt \quad (5.23)$$

Nejhorší případ nastává při zkratech v obvodech, které jsou v ustáleném stavu po dlouhodobém oteplení jmenovitým proudem. Výsledné oteplení je tedy součtem dlouhodobého a krátkodobého oteplení

$$\vartheta_c = \vartheta_0 + \Delta\vartheta_{max} + \Delta\vartheta_{kd} \quad (^\circ\text{C}) \quad (5.24)$$

## 5.3 Ochlazování

Předpokladem chlazení je rozdílná teplota tělesa a prostředí okolo něho. Jinak řečeno, pro přestup tepla zde musí být teplotní spád neboli teplotní gradient. Nemusí se vždy jednat o přímé předání tepla okolí, v procesu může být zapojen nějaký mezičlánek, jako je například transformátorový olej. Nejprve se předá teplo z vinutí oleji a až v další fázi olej předává teplo do okolí. Předání může probíhat již zmíněnými způsoby:

- konvekcí
- kondukcí
- radiací

## 5.4 Druhy chladiv

Transformátory malých výkonů jsou obvykle chlazeny vzduchem. Pro velké transformátory se vzduch již nevyužívá. Chladí se hlavně olejem, protože voda je i při nepatrném znečištění vodivá a rozkládá se na vodík a kyslík.

### Označení chladiv

- A - vzduch
- W - voda
- O - olej
- L - nehořlavá izolační kapalina
- G - plyn
- S - pevný izolant

### Označení druhu oběhu chladiva

- N - přirozený
- F - nucený neřízený
- D - nucený řízený

## 5.5 Transformátorový olej

Jako chladivo transformátorů malých výkonů se využívá především vzduch. Pro vyšší výkony se v elektroenergetice používá olej, protože voda jako chladivo je nevhodná, protože se v důsledku vířivých proudů rozkládá na kyslík a vodík. Na transformátorové oleje je kladeno mnoho požadavků. Transformátorové oleje můžeme dle druhu rozdělit na:

- neinhibované transformátorové oleje
- inhibované transformátorové oleje

### Neinhibované transformátorové oleje

Tyto oleje mají výborné elektroizolační vlastnosti. Zabezpečují dobrý odvod tepla a mají dobrou oxidační stálost. Oleje mají vysoké průrazné napětí a mají nízké dielektrické ztráty. Nereagují s materiály běžně používanými v transformátorech a nezpůsobují tedy korozi. Jejich využití bývá převážně v nízkonapěťových soustavách. Jejich nevýhodou je, že se nedají regenerovat.

## **Inhibované transformátorové oleje**

Oproti předchozím mají velkou výhodu v tom, že při zhoršení jejich vlastností se dají zregenerovat a opětovně použít. Mají vysoké průrazné napětí a nízké dielektrické ztráty. Využívají se především u vysokonapěťových transformátorů.

### **5.5.1 Parametry transformátorových olejů**

U olejů pro transformátory s napětím 110 kV a vyšším se měří průrazné napětí, kyselost, obsah vody, ztrátový činitel, povrchové napětí a obsah inhibitoru. Počet sledovaných parametrů u transformátorových olejů se zpravidla zvyšuje s napěťovou hladinou a výkonem transformátoru. Například u transformátorů s výkony nad 100 MVA se provádí kromě již zmíněných měření také kvantitativní a kvalitativní analýza plynů obsažených v oleji.

### **Měření průrazného napětí**

Jedinou zkouškou, ze které lze přímo posoudit izolační stav oleje, je měření hodnoty průrazného napětí. Z této hodnoty však není možné posoudit stupeň provozního zestárnutí oleje. Hodnota průrazného napětí je sumární veličina, na kterou má podstatný vliv obsah emulgované nebo vázané vody, pevné nečistoty a obsah plynů.

### **Číslo kyselosti**

Číslo kyselosti je z hlediska provozního zestárnutí oleje nejvýznamnější hodnotou. Vznikající kyseliny oxidačními pochody mají degradační účinky nejen na korodující kov, ale také na izolanty, to má vliv zejména na mechanickou pevnost celulózových izolantů. Konečnými produkty oxidace jsou nerozpustné usazeniny a kaly, které zhoršují odvod tepla z aktivních částí stroje. U nových transformátorových olejů číslo kyselosti indikuje stupeň rafinace oleje, případně upozorňuje na přítomnost organických kyselin zbylých z rafinace.

### **Obsah vody**

Voda jak v emulgované tak i ve vázané formě snižuje výrazně hodnotu průrazného napětí a urychluje degradaci pevných izolací. Voda se v oleji objevuje vlivem nedokonalé izolace nádoby transformátoru od okolní atmosféry, vzniká také jako produkt oxidačního stárnutí celulózy a je vedlejším produktem při polykondenzačních reakcích. Je-li obsah vody v izolačním oleji větší než povolená hodnota, je třeba provést vysušení olejové náplně a izolačního systému transformátoru.

### **Ztrátový činitel**

Ztrátový činitel indikuje přítomnost pevných částic, rozpuštěných polárních a iontových složek v oleji. Když je hodnota vyšší než povolená a prokáže-li měření dalších veličin vylučování kalů, je nutné olejovou náplň zregenerovat nebo vyměnit.

### **Rezistivita**

Velikost resistivity závisí na obsahu nečistot, obsahu vody a stupni oxidace transformátorového oleje. Měření resistivity umožňuje detekci absorbované vody a produktů vznikajících při stárnutí oleje. Je to však jen veličina, která usnadňuje rozhodování při posuzování ztrátového činitele

### **Mezipovrchové napětí na rozhraní olej - voda**

Z hodnoty mezipovrchového napětí lze zjistit přítomnost polárních látek již při velmi nízkých koncentracích. Tyto látky vznikají při provozním stárnutí oleje. Pokles hodnoty mezipovrchového napětí pod dovolenou hranici vypovídá o tvorbě kalů v oleji.

### **Obsah inhibitoru**

Stárnutí oleje se zpomaluje přidáním příměsí. Přidávají se antioxidační inhibitory v množství 0,3% až 0,5% hmotnosti oleje. V provozu se poté zjišťuje, do jaké míry byl inhibitor spotřebován v důsledku provozního stárnutí. [6]

## **5.5.2 Stárnutí oleje**

Stárnutí oleje způsobuje tvorbu kyselin a kalů. V oleji se tvoří větší molekuly a to zvyšuje viskozitu a zpomaluje proudění oleje. Tím se snižuje chladicí schopnost a transformátory se přehřívají. Vznikající kyseliny také napadají izolaci v transformátoru, to vede mimo jiné k tvorbě vody a dalších produktů. Obsah vody nesmí překročit dovolenou hranici. Vlivy působící na stárnutí a degradaci oleje jsou:

- teplo
- elektrické pole
- obsah vody a kalů
- katalytické působení mědi



Při stárnutí (zhoršení vlastností) transformátorového oleje je třeba jeho vyčištění popřípadě výměna celé olejové náplně.

### 5.5.3 Čištění, filtrace a regenerace transformátorových olejů

#### Čištění a filtrace

Při těchto procesech se odstraňují z transformátorového oleje především pevné nečistoty, voda a plyny. Tímto způsobem se zlepšují některé vlastnosti oleje na požadovanou úroveň. Jedná se především o preventivní údržbu.

#### Regenerace

V případech, že olej v transformátoru zestárne natolik, že další filtrace již nepostačuje, musí se vyměnit nebo zregenerovat. Regenerace je komplexní úprava, která navrácí oleji jeho původní vlastnosti. Je výhodnější než kompletní výměna olejové náplně. [7]

Transformátorový olej	před regenerací	po regeneraci
průrazné napětí (kV / 2,5 mm)	~ 30	> 70
číslo kyselosti (mg KOH / g)	> 0,15	< 0,01
ztrátový činitel (%)	~ 10	< 0,4
mezipovrchové napětí (mN / m)	~ 25	> 50
obsah vody (ppm)	> 35	< 10
rezistivita (GΩm)	> 60	> 150
obsah inhibitoru (%)	< 0,05	> 0,3

Tab. 5.1 Hodnoty parametrů transformátorového oleje před a po regeneraci [7]

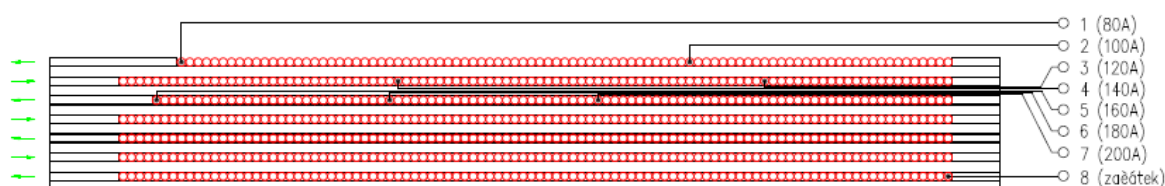
## 6 Vlastní řešení – Oteplení typové tlumivky

Cílem vlastní práce je analýza oteplení typové olejové zhášecí vysokonapěťové tlumivky. Jedná se o reálnou verzi a provedení tlumivky typového výrobce. Z pohledu provedení a konstrukčních detailů se jedná o novou vyvíjenou a optimalizovanou verzi. Z tohoto důvodu v následném textu nejsou uvedeny přesné rozměry, výkresy, výrobní detaily, ale jsou vždy uvedeny jen principiální náhledy a přibližné rozměry. Přibližná podoba řešení tlumivky je na obrázku 6.1. Pro upřesnění se jedná o jednofázovou tlumivku s přepínatelnými odbočkami. Nastavitelné odbočky tlumivky jsou 80, 100, 120, 140, 160, 200 A, hladina napětí 11,55 kV.

Přibližné rozvržení vinutí je na obrázku 6.2. Maximální doba provozu této tlumivky při zatížení je 10 min a proto je zde možná i vyšší proudová hustota pro ušetření Cu vodiče.



Obr. 6.1 Zhášecí tlumivka



Obr. 6.2 Vinutí s odbočkami

Hlavním cílem vlastního řešení práce bylo pomocí modelové počítačové 3D simulace a metod konečných objemů komplexně analyzovat oteplení tlumivky (vinutí, oleje, magnetického jádra) s respektováním samovolného proudění oleje vinutí pro zvolený zátěžný proud na dané odbočce vinutí tlumivky.

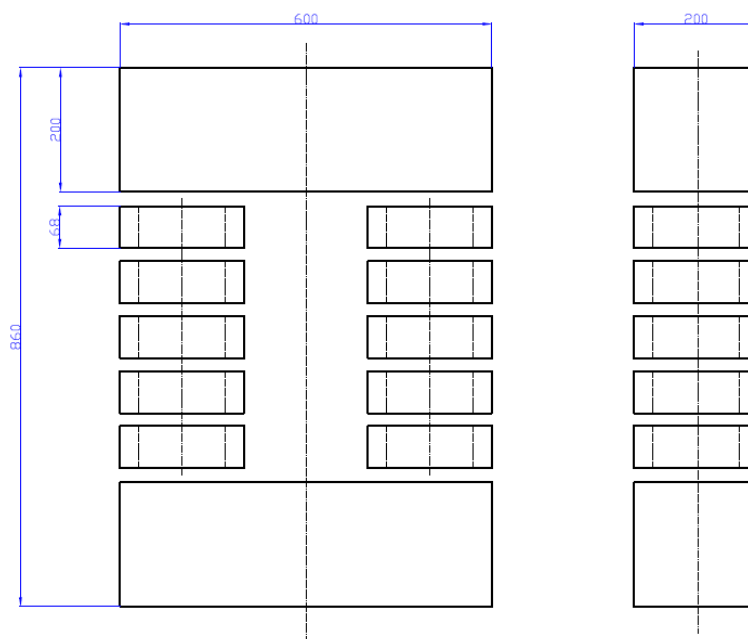
Vlastní řešení úkolu lze rozdělit na následující části:

- část 1) Rozbor provedení a shrnutí rozměrů tlumivky pro řešení
- část 2) Rychlá přibližná analýza oteplení vinutí analytickým výpočtem
- část 3) Tvorba 3D geometrického modelu zadané tlumivky (magnetické jádro, vinutí, olej)
- část 4) Tvorba 3D výpočetní sítě v prostředí CFX
- část 5) Nastavení materiálových vlastností a okrajových podmínek pro výpočet
- část 6) Vlastní modelový výpočet
- část 7) Zpracování a vyhodnocení výsledků výpočtu

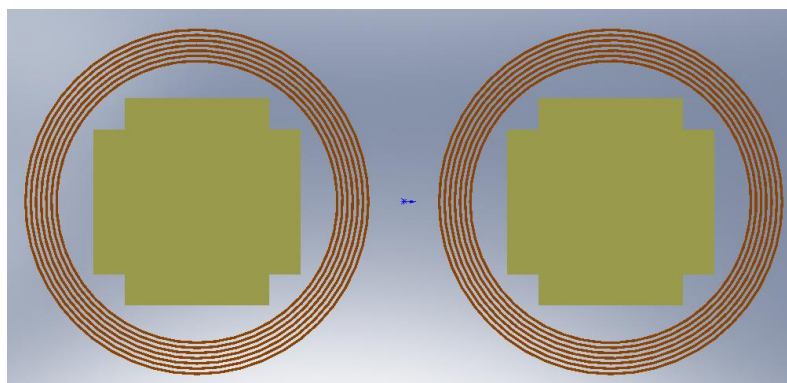
## 6.1 Shrnutí provedení řešené tlumivky

Model se skládá z profilovaného jádra s mezerami vyplněnými pertinaxovou izolací. Jelikož se jedná o vyráběnou zhášecí tlumivku, jsou rozměry uváděny jen přibližné. Nádoba má velikost 1300 x 860 x 470 mm, jádro má rozměry 860 x 600 200 mm (obr. 6.3) a jádro je dvoustupňové.

Cívka tlumivky v reálném provedení má sedm vrstev a je vyrobena z vodiče kruhového průřezu, pro účely simulace oteplení byly tyto vrstvy nahrazeny válcovým objem cívky adekvátního účinného obdelníkového průřezu o rozměrech, tloušťka 2,5 mm a výška 330 mm. Mezery mezi vrstvami pro proudění chladiva jsou 2,5 mm. Uspořádání vrstev tlumivky je vidět na obr. 6.4. Poloměr první vrchní vrstvy cívky je 167 mm a poloměr poslední spodní vrstvy je 137 mm.



Obr. 6.3 Profil jádra



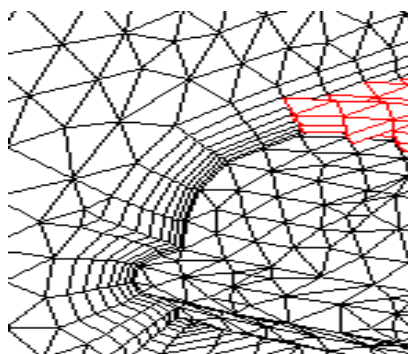
Obr. 6.4 Provedení vrstev vinutí

### 6.1.1 Princip softwarového řešení

**Metoda konečných objemů** spočívá stručně řečeno ve třech základních bodech

- dělení oblasti na diskrétní objemy užitím obecné křivočaré sítě
- bilancování neznámých veličin v individuálních konečných objemech a diskretizace
- numerické řešení diskretizovaných rovnic

Numerická metoda konečných objemů je založena na vytvoření systému nepřekrývajících se elementů, konečných objemů. Původně byla metoda konečných objemů postavena na konečných objemech tvaru obdélníků a křivočarých čtyřúhelníků ve 2D a kvádrů nebo obecných šestistěnů v 3D úlohách. Zásadním pravidlem je, že hranice prvků musí sousedit s jedinou hranicí sousedního elementu, nejde tedy libovolně zhušťovat síť. Ale výše vyjmenované prvky se v současné době mohou kombinovat, čímž se získá optimální síť, kde v okolí stěny jsou použity čtyřúhelníky a kvádry (pro výpočet z hlediska přesnosti jsou optimální) a v dalších oblastech, kde nedochází z důvodu existence mezní vrstvy k velkým gradientům řešených veličin, se použijí zbývající prvky. Ty zajistí snadnou změnu hustoty sítě.



Obr. 6.5 Příklad kombinace elementů konečných objemů (lit. [4])

## Integrace metodou konečných objemů

Integrace diferenciálních rovnic je zjednodušeně vysvětlena s použitím kartézských souřadnic. A pro jednoduchost je vysvětlena na rovnicích o jedné prostorově nezávislé proměnné, které lze interpretovat jako proudění v 3D prostoru, kde všechny derivace proměnných ve směru  $y$  a  $z$  jsou rovny nule.

Rovnice kontinuity je tedy definována takto:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (6.1)$$

rovnice zachování hybnosti je definována

$$\frac{\partial}{\partial x}(uu) = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ v \frac{\partial u}{\partial x} \right] + S \quad (6.2)$$

a rovnice pro přenos skalární veličiny je

$$\frac{\partial}{\partial x}(u\xi) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ a_\xi \frac{\partial \xi}{\partial x} \right] + S_\xi \quad (6.3)$$

Integrací těchto rovnic přes konečné objemy se převedou výchozí diferenciální rovnice na objemový integrál  $dV = dx \cdot dy \cdot dz$ , a užitím divergenčního teorému na plošný  $dA = dy \cdot dz$

$$\iiint_V \left( \frac{\partial a_x}{\partial x} + \frac{\partial a_y}{\partial y} + \frac{\partial a_z}{\partial z} \right) dx dy dz = \iint_S (a_x dy dz + a_y dx dz + a_z dx dy) \quad (6.4)$$

kde malá písmena označují hranice (stěny konečných objemů) a velká písmena označují středy konečných objemů. Diskretizace na výsledný algebraický tvar se děje následujícím způsobem

$$\int_V \frac{\partial u}{\partial x} dV = \int_V \frac{\partial u}{\partial x} dx dy dz = \int_A (u) dA = (uA)_e - (uA)_w \quad (6.5)$$

A integrace rovnice kontinuity vede na

$$(uA)_e - (uA)_w = 0 \quad (6.6)$$

Fyzikálně se rozdíly označují jako rozdíl objemových průtoků

$$Q_e - Q_w = 0 \quad (6.7)$$

Integrací rovnice zachování hybnosti (rovnice 6.2) se získá

$$Q_e u_e - Q_w u_w = -\frac{1}{\rho} (p_e - p_w) \cdot A + \left( v_e \frac{u_e - u_p}{\Delta x_e} \right) \cdot A - \left( v_w \frac{u_p - u_w}{\Delta x_w} \right) \cdot A + S \cdot \Delta V \quad (6.8)$$

A rovnice pro skalární veličinu (rovnice 6.3) se upraví na tvar

$$Q_e \cdot \xi_e - Q_w \cdot \xi_w = \left( \alpha_e \frac{\xi_e - \xi_p}{\Delta x_e} - \alpha_w \frac{\xi_p - \xi_w}{\Delta x_w} \right) \cdot A + S_\xi \cdot \Delta V \quad (6.9)$$

Určitou nevýhodou předešlých rovnic je to, že se používají veličiny a koeficienty definované jak ve středech konečných objemů tak na stěnách těchto objemů. Je proto tedy důležité definovat ukládání veličin a koeficientů pouze do středu konečných objemů, tzn. pro stěny se použije určité interpolační schéma které převede tyto hodnoty do středu buňky. Například jako nejjednodušší interpolační schéma lze využít aritmetický průměr. To znamená, že rovnice 6.8 se dá upravit na

$$Q_e \frac{u_e + u_p}{2} - Q_w \frac{u_p + u_w}{2} = -\frac{1}{\rho} (p_e - p_w) \cdot A + \left( v_e \frac{u_p - u_e}{\Delta x_e} - v_w \frac{u_p - u_w}{\Delta x_w} \right) \cdot A + S \cdot \Delta V \quad (6.10)$$

a rovnice pro obecnou proměnnou

$$Q_e \frac{\xi_p + \xi_e}{2} - Q_w \frac{\xi_p + \xi_w}{2} = \left( \alpha_e \frac{\xi_e - \xi_p}{\Delta x_e} - \alpha_w \frac{\xi_p - \xi_w}{\Delta x_w} \right) \cdot A + S_\xi \cdot \Delta V \quad (6.11)$$

Pak lze pro tuto obecnou rovnici v jednorozměrném případě vyjádřit  $\xi_p$  pomocí hodnot v sousedních konečných objemech následujícími úpravami

$$\left( \frac{Q_e}{2} - \frac{Q_w}{2} + \alpha_e \frac{A}{\Delta x_e} - \alpha_w \frac{A}{\Delta x_w} \right) \xi_p = \left( -\alpha_e \frac{A}{\Delta x_e} - \frac{Q_e}{2} \right) \xi_e + \left( +\alpha_w \frac{A}{\Delta x_w} + \frac{Q_w}{2} \right) \xi_w + S_\xi \cdot \Delta V \quad (6.12)$$

Rovnici 6.12 lze obecně přepsat na

$$\xi_p \sum_i (-A_i - S_p) = \sum_i (A_i \cdot \xi_i + S_c) \quad (6.13)$$

kde součet je proveden přes sousední buňky. Koeficienty označené  $A_i$  obsahují příspěvky od konvektivních a difuzních členů.  $S_p$  a  $S_c$  jsou složky linearizovaných zdrojových členů.

Rovnice řešení v softwaru CFX jsou rozšířením předchozích rovnic na trojrozměrný křivočarý souřadný systém.

### **Program SolidWorks 2007**

Pro návrh modelu jsem využil SolidWorks 2007. Tento program je využívám především pro strojírenství. Návrh jsem provedl v tomto programu, protože se jedná o velice intuitivní 3D systém a tvorba modelu je zde praktičtější než v prostředí ANSYS Workbench.

### **Prostředí ANSYS Workbench**

Jedná se o 3D software určený k modelování magnetických, elektromagnetických, tepelných a dalších jevů působících na vytvořené modely. Do tohoto prostředí lze importovat modely z programu SolidWorks. Softwary od společnosti ANSYS jsou založeny na metodě řešení pomocí konečných prvků, nebo metody konečných objemů.

### **Prostředí ANSYS / CFX**

Tento 3D software je určen především pro modelování proudění. Také využívá metody konečných objemů. Skládá se ze tří částí. CFX – Pre, CFX – Solver a CFX – Post. Tyto části lze spouštět nezávisle na sobě, anebo jako podprogram v softwaru ANSYS Workbench. Jednotlivé části jsou určeny pro definování modelu (materiály, počáteční podmínky, typ proudění apod.), pro výpočet (nastavení iterace, typu výpočtu atd.) a pro zobrazení vypočtených výsledků .

## 6.2 Analytický výpočet

Prvním krokem před zahájením řešení modelového výpočtu oteplení s respektováním proudění byl přibližný výpočet oteplení vinutí pomocí klasických analytických vztahů, jenž jsou podrobně uvedeny v páté kapitole. Jedná se o výpočet podle principu dlouhodobého a krátkodobého oteplení.

Tab. 6.1 Zadané hodnoty pro výpočet

Výpočet oteplení - konstanty		
d	3,3	mm
$\rho$	0,018	$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$
$\alpha$	30	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
c	384	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
I	100	A
S	8,55	$\text{mm}^2$
P	10367,26	$\text{mm}^2$

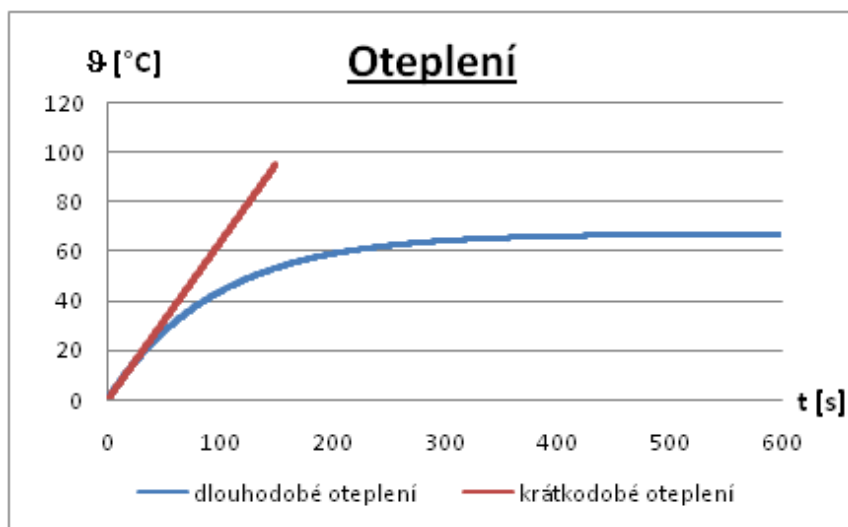
Dlouhodobé oteplení se vypočítá dle vzorce, a čas je od 0 do 600 s.

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{\max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = 67,13 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{94,69}}\right) \quad (^\circ\text{C}) \quad (6.14)$$

Krátkodobé oteplení, při zanedbání odvodu tepla do okolí se vypočítá následovně

$$\Delta\vartheta_{kd} = \left(\frac{\rho \cdot I^2}{c \cdot S^2}\right) \cdot t = 0,636 \cdot t \quad (^\circ\text{C}) \quad (6.15)$$

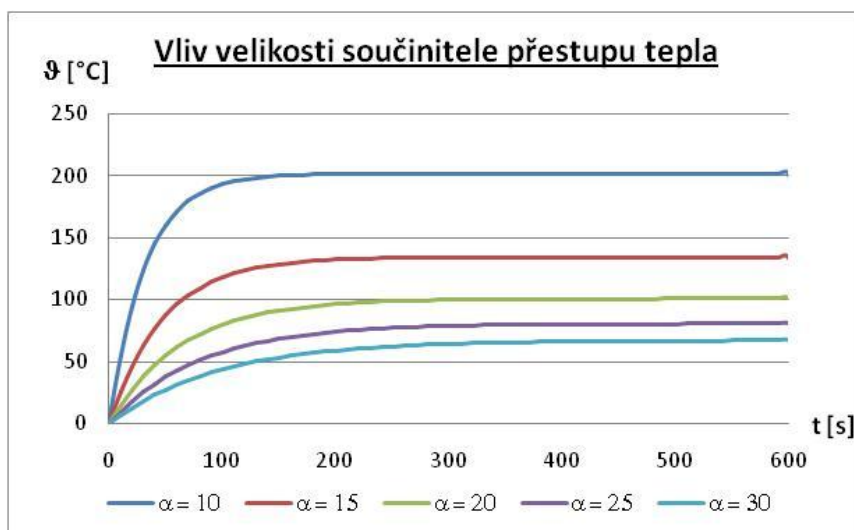
Jak je vidět na grafu krátkodobé oteplení je tečnou dlouhodobého.



Obr. 6.6 Graf dlouhodobého a krátkodobého oteplení

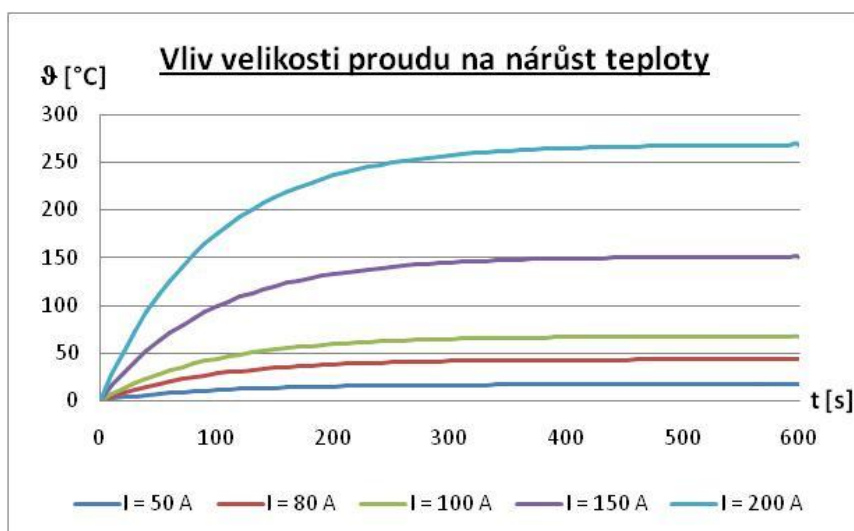


Pro ilustraci je na grafu vidět vliv velikosti součinitele přestupu tepla  $\alpha$  na tvar průběhu oteplení. Čím vyšší je součinitel  $\alpha$  tím nižší je ustálená teplota.



Obr. 6.7 Vliv velikosti  $\alpha$  na přestupu tepla

Na nárůst teploty má velký vliv protékající proud  $I$ . Čím je proud vyšší tím vyšší je i oteplení. To ukazuje obrázek 6.8

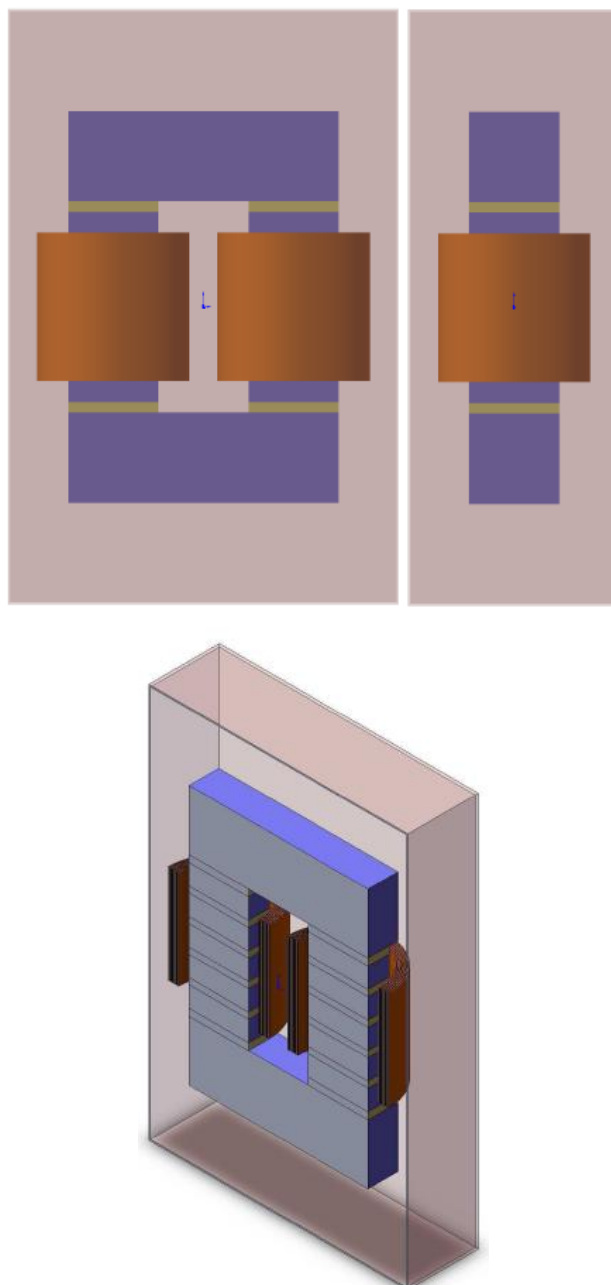


Obr. 6.8 Vliv velikosti  $I$  na přestupu tepla

## 6.3 Příprava 3D geometrického modelu

### SolidWorks

Nejprve jsem v SolidWorks 2007 nakreslil 2D skicu ze které jsem poté vysouval 3D prvky. Jelikož mají prvky různé materiálové vlastnosti musí být jednotlivé prvky vysouvány samostatně aby nedošlo k jejich sloučení a znemožnění pozdějšího definování jejich parametrů.

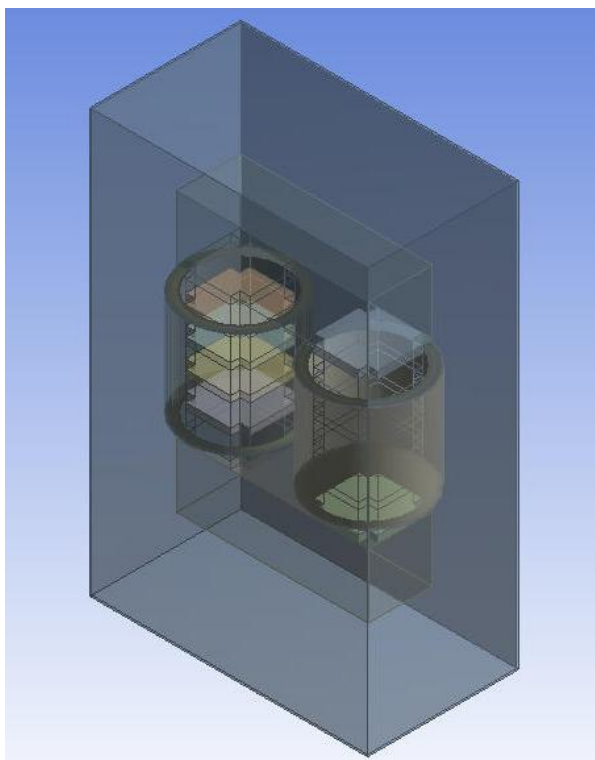


Obr. 6.9 Pohled na tlumivku

### ANSYS Workbench

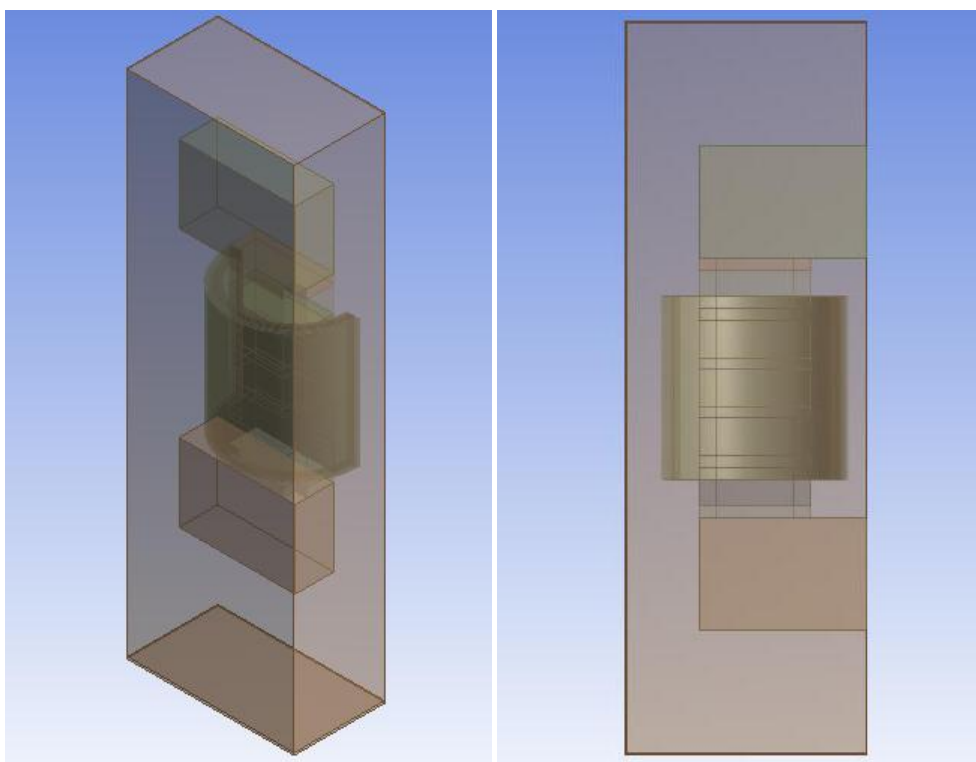
Další příprava modelu probíhala v softwarovém prostředí ANSYS Workbench. Do tohoto softwaru jsem importoval databázi součástky ze SolidWorks (obr. 6.10), tzv. parasolid.

Parasolid zachovává jen základní informace o modelu, jako jsou rozměry a vzájemné vazby. Poté jsem pomocí funkce „vylít“ vytvořil objem oleje.



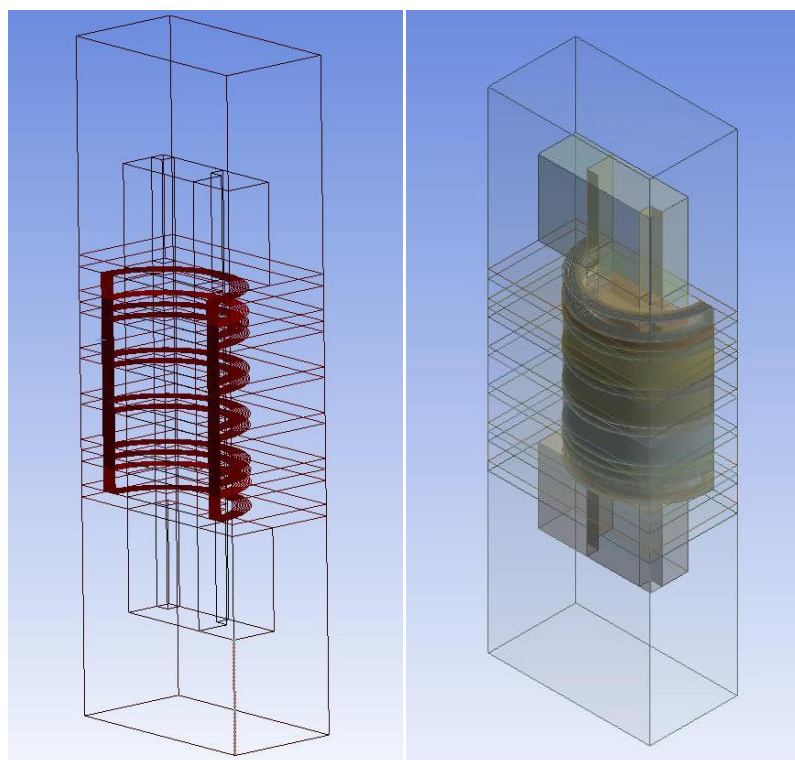
Obr. 6.10 Model tlumivky v ANSYS Workbench

Zásadním problémem při řešení takovýchto úloh je časová náročnost. Celý model by spotřeboval vysoké množství výpočetních elementů a proto je z důvodu ušetření výpočetních elementů použita  $\frac{1}{4}$  modelu. Využil jsem proto osové symetrie modelu a dle rovin XY a YZ jsem model rozřezal (obr. 6.11).



Obr. 6.11  $\frac{1}{4}$  modelu

Model jsem poté dělil rovinami na dílčí objemy (obr. 6.12) pro zjemnění výpočetní sítě, prostor v oleji mezi vrstvami musí mít nejméně 10 elementů pro zachycení přirozené konvence. Naopak např. v jádře nedochází k velkým změnám teplot a proto by zde jemná síť byla nadbytečná. Bez rozdělení na menší objemy by výpočetní síť nebyla správně napojena.



Obr. 6.12 Rozdělení tlumivky na dílčí objemy

Po provedení operace rozřezání modelu jsem sjednocoval jednotlivé objemy a s slučoval do společných prvků jako například vinutí, nebo jádro. Po sloučení objemů jsem dále vybíral jednotlivé plochy těchto prvků. Jedná se o nejnáročnější krok v přípravě, protože jednotlivé plochy nařezaného modelu nelze slučovat automaticky, ale plochy jsem musel vybírat manuálně.

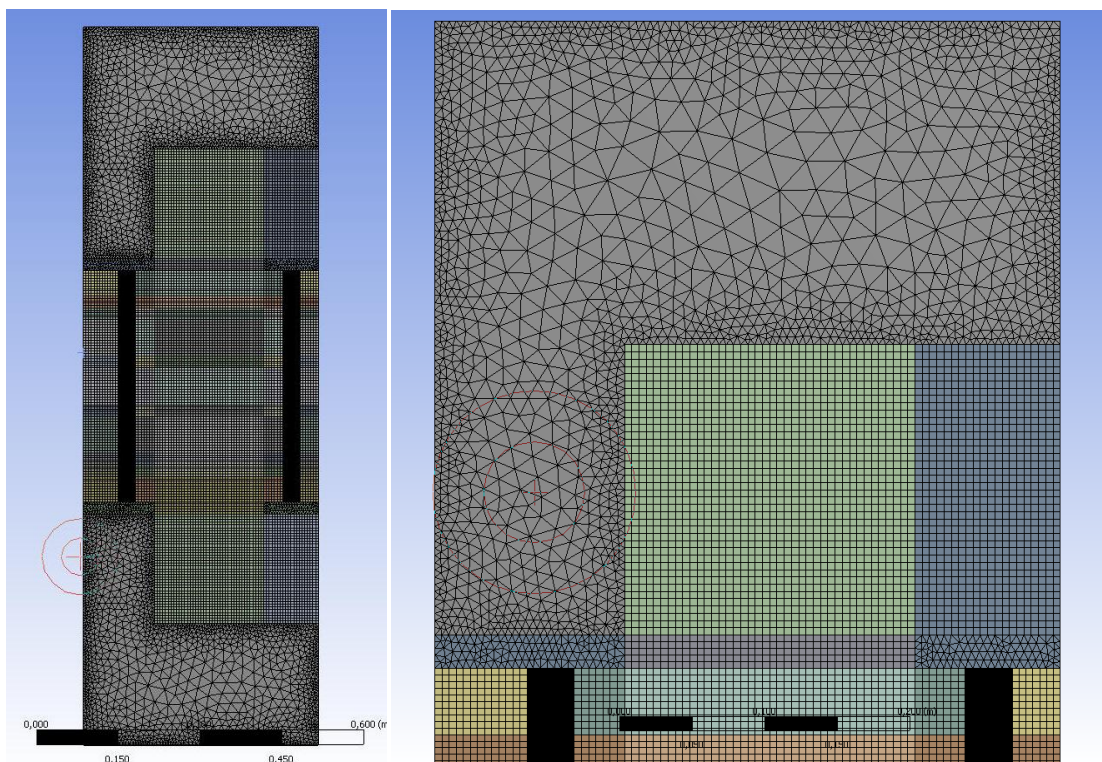
Jedná se totiž o styčné plochy prvků s různými materiálovými vlastnostmi (vinutí – olej, jádro – olej, jádro – izolace). Důležitým krokem při výběru bylo také pojmenování těchto ploch pro usnadnění práce v softwarovém prostředí ANSYS / CFX. Příprava těchto ploch je nedílnou součástí, protože software ANSYS / CFX pracuje s plochami, na kterých dochází ke změně materiálových vlastností. Musí mít tedy definovanou plochu jak na straně pevného tělesa, tak i na straně kapaliny, tzv. interface.

## 6.4 Vytvoření výpočetní sítě

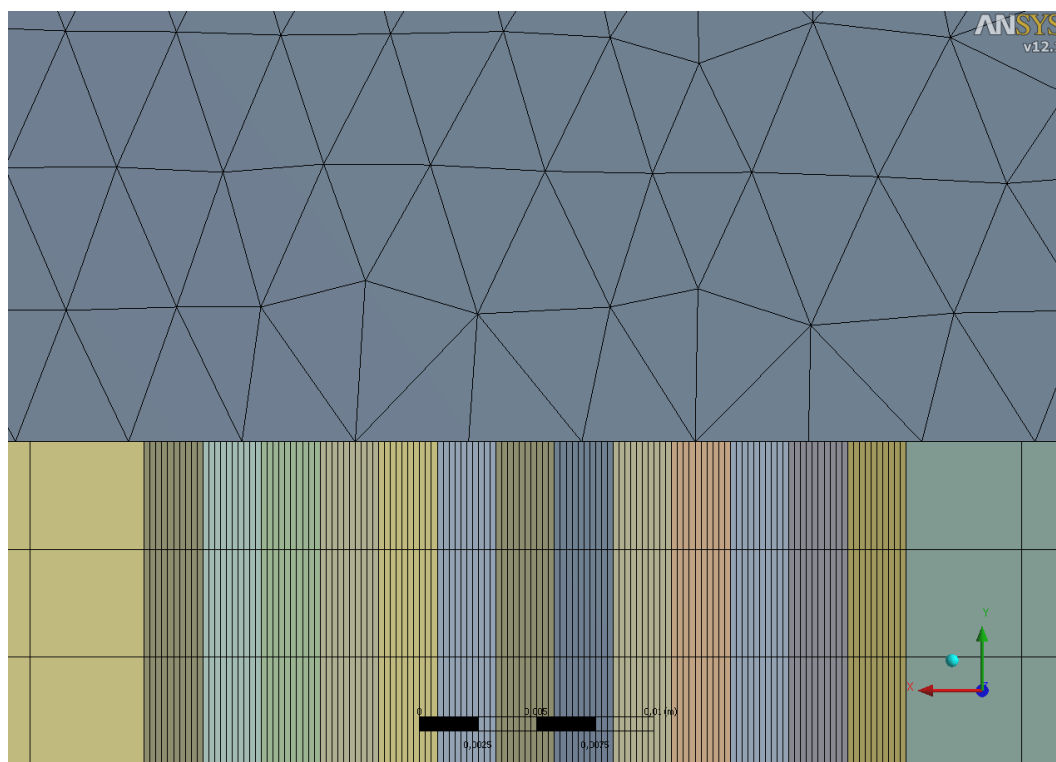
Příprava výpočetní sítě, neboli MESHování je velice podstatný krok pro výpočet v softwaru pracujícím metodou konečných objemů. Kvalita resp. jemnost sítě je určující pro přesnost výsledků výpočtu, ale také pro jeho rychlost. Využitím toho, že je model symetrický dle roviny XY a roviny YZ, jsem mohl počítat jen s ¼ modelu a ušetřit tak přebytečné elementy.

Pro řešení problému proudění v ANSYS / CFX je nejvhodnější použití tzv. elementů SWEEP. [8] Jedná se prostor v blízkosti vinutí,

Vymeshovaná výpočetní síť je na obr. 6.13. Síť musí být nejjemnější v prostředí oleje mezi vrstvami cívky a v jejím nejbližším okolí, protože zde bude teplotní gradient nejvyšší. Do prostoru mezi 2 vrstvami, tedy na šířku 2,5 mm jsem definoval 10 elementů. Detail je vidět na obr. 6.14. Délka a výška těchto elementů již není tak podstatnou.



Obr. 6.13 Vymeshovaná výpočetní síť



Obr. 6.14 Detail sítě v blízkosti vinutí

Na počtu a velikosti elementů vymeshované sítě závisí jak přesnost tak i rychlost výpočtu. Množství jednotlivých uzlů a elementů udává tabulka 6.2.

Tab. 6.2 Rozložení jednotlivých uzlů a elementů v oblastech modelu

Oblast	Uzly	Elementy
Jádra	165795	148416
Olej	518963	771475
Cívka	230461	201600
Izolace	28404	21840
Celková oblast	943623	1143331

## 6.5 Definování problému v ANSYS CFX (CFX – Pre)

První ze tří částí ANSYS / CFX je CFX – Pre. Jedná se o preprocesor ve kterém se definují vlastnosti modelu, jako jsou například okrajové podmínky, materiál, typ proudění, tlak apod.

Nejprve jsem načel připravený model s výpočtovou sítí. Určil jsem objemy pevných těles a objem oleje, poté jsem definoval jednotlivé styčné plochy (interface) mezi pevnými tělesy a mezi pevným tělesem a olejem.

Pro spuštění úlohy v CFX – Solver je nutné určit počáteční podmínky. Inicializace v čase  $t = 0$  s, tzn. teplota těles a oleje je  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pro olej se musí ještě nastavit rychlost proudění oleje na počátku simulace, tzn.  $0\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a gravitační zrychlení v ose Y, tedy  $g = -9,81\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

V další části jsem definoval materiálové vlastnosti, především tepelnou vodivost  $\lambda$  a měrnou tepelnou kapacitu  $c$ . Hodnoty materiálových vlastností jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab.6.2 Materiálové vlastnosti mědi

Materiál	Měď (Cu)
Hustota ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	8933
Tepelná vodivost ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	401
Měrná elektrický odpor ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	$1,72 \cdot 10^{-8}$
Molární hmotnost ( $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ )	63,54
Měrná tepelná kapacita ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	384,5
Referenční teplota ( $^{\circ}\text{C}$ )	20

Tab. 6.3 Materiálové vlastnosti železa

Materiál	Železo (Fe)
Hustota ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	7870
Tepelná vodivost ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	80,2
Molární hmotnost ( $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ )	55,82
Měrná tepelná kapacita ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	447
Referenční teplota ( $^{\circ}\text{C}$ )	20



Tab.6.4 Materiálové vlastnosti pertinaxu

Materiál	Pertinax
Tepelná vodivost ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	0,2
Izolační odpor ( $\Omega$ )	$1,0\cdot 10^6$
Průrazné napětí (kV)	25
Měrná tepelná kapacita ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	1470
Referenční teplota ( $^{\circ}\text{C}$ )	20

Kinetická i dynamická viskozita je proměnná s teplotou, pro transformátorový olej je hodnota kinetické viskozity  $\nu_0 = 11\cdot 10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ . Teplotní závislost udává vztah 6.16

$$\nu = \nu_0 \cdot e^{-\alpha t} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (6.16)$$

a po dosazení hodnot má vztah podobu

$$\nu = 11 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-0,04 \cdot t} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (6.17)$$

Přepočet mezi kinetickou a dynamickou viskozitou je:

$$\eta_0 = \nu_0 \cdot \rho \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad (6.18)$$

a tedy

$$\eta_0 = 11 \cdot 10^{-6} \cdot 880 = 9,68 \cdot 10^{-3} \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad (6.19)$$

Poté pro teplotní závislost dynamické viskozity lze psát:

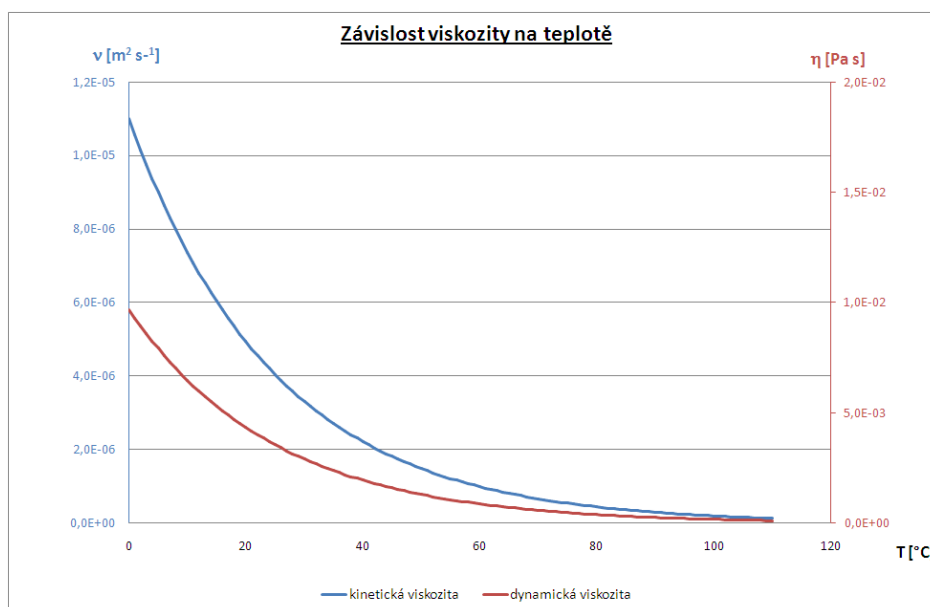
$$\eta = \eta_0 \cdot e^{-\alpha t} \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad (6.20)$$

Zadání dynamické viskozity dle rovnice

$$\eta = 9,68 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0,04 \cdot t} \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad (6.21)$$

jsem v softwaru zadával včetně jednotek (jedná se o užitečnou pomůcku v CFX, protože se tím eliminuje výskyt chyb), tedy takto:

$$(0.00968*\exp(-0.04 [\text{K}^{-1}] *(T-293 [\text{K}]))) * 1 [\text{Pa} \cdot \text{s}] \quad (6.22)$$



Obr. 6.15 Závislost kinetické a dynamické viskozity na teplotě

Tab.6.5 Materiálové vlastnosti transformátorového oleje

Materiál	Transformátorový olej
Hustota ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	880
Tepelná vodivost ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	0,123
Molární hmotnost ( $\text{kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$ )	135,1
Měrná tepelná kapacita ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	1800
Referenční teplota ( $^{\circ}\text{C}$ )	20
Kinetická viskozita ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )	$11\cdot 10^{-6}$
Dynamická viskozita ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )	$9,68\cdot 10^{-3}$
Viskózní index ( $\text{K}^{-1}$ )	0,04
Objemová roztažnost ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	$0,75\cdot 10^{-3}$
Povrchové napětí ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ )	0,038

V modelu je vždy místo s tzv. referenční teplotou, tzn. olej chladnější než  $T_{ref}$  klesá, naopak teplejší olej stoupá. Jelikož se ale tato teplota mění je zadána vzorcem

$$T_{ref} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (^{\circ}\text{C}) \quad (6.23)$$

Výpočet je určen na základě zadání ztrát ve vinutí. V softwaru CFX jsou tyto ztráty zadány v jednotce  $W \cdot m^{-3}$ , a tedy

$$Q = \frac{P}{V} = \frac{R \cdot I^2}{S_v \cdot l} = \frac{\rho_0 \cdot \frac{l}{S_v} \cdot I^2}{S_v \cdot l} = \rho_0 \cdot \frac{I^2}{S_v^2} \quad (W \cdot m^{-3}) \quad (6.24)$$

$$Q = \rho_0 \cdot \frac{I^2}{S_v^2} = 1,78 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{100^2}{(8,556 \cdot 10^{-6})^2} = 2\,433\,237,4 \, W \cdot m^{-3} \quad (6.25)$$

Ztráty v železe jsou také zadávány ve  $W \cdot m^{-3}$ , jedná se o transformátorové plechy 0,35 mm, katalogová hodnota je  $0,5 \, W \cdot kg^{-1}$ , pro přepočet jsem využil tabulkové hodnoty měrné hustoty a tedy

$$Q_{Fe} = 0,5 \cdot 7870 = 3935 \, W \cdot m^{-3} \quad (6.26)$$

Protože zdroj tepla bude 600 s v zapnutém stavu a dalších 600 s ve vypnutém, je využita tzv. funkce Step. Tj. při kladném rozdílu je zdroj tepla násoben 1, při nulovém rozdílu je násoben 0,5 a při záporném rozdílu je násoben 0. Tato funkce simuluje odpojení zdroje.

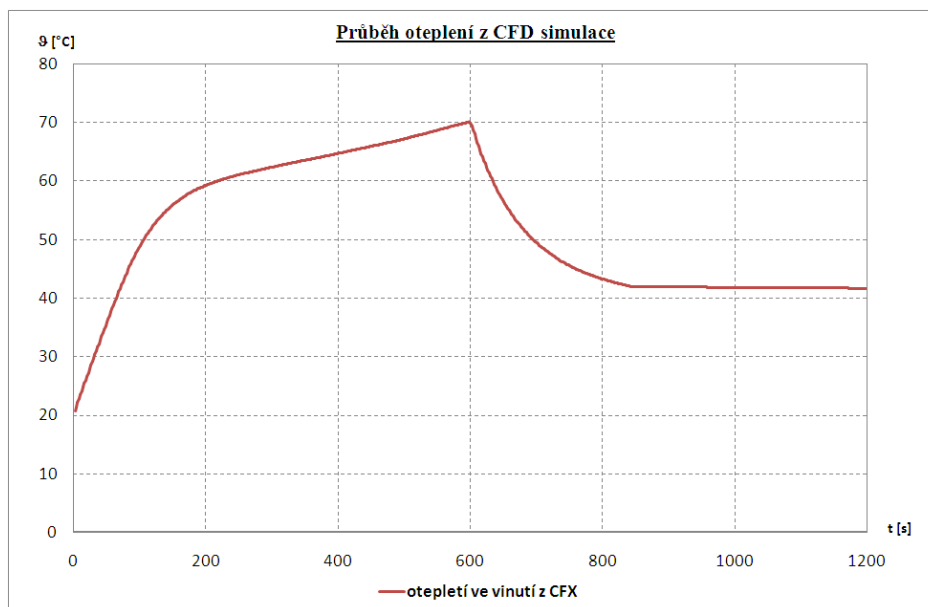
## 6.6 Výpočet řešení v ANSYS CFX (CFX – Solver)

CFX – Solver je určen pro výpočet připraveného modelu. Po dosažení požadovaného času výpočtu se Solver ukončí a výsledky jsou připraveny pro načtení v postprocesoru. Toto je časově nejnáročnější část. Doba běhu mého výpočtu byla cca 10 dní.

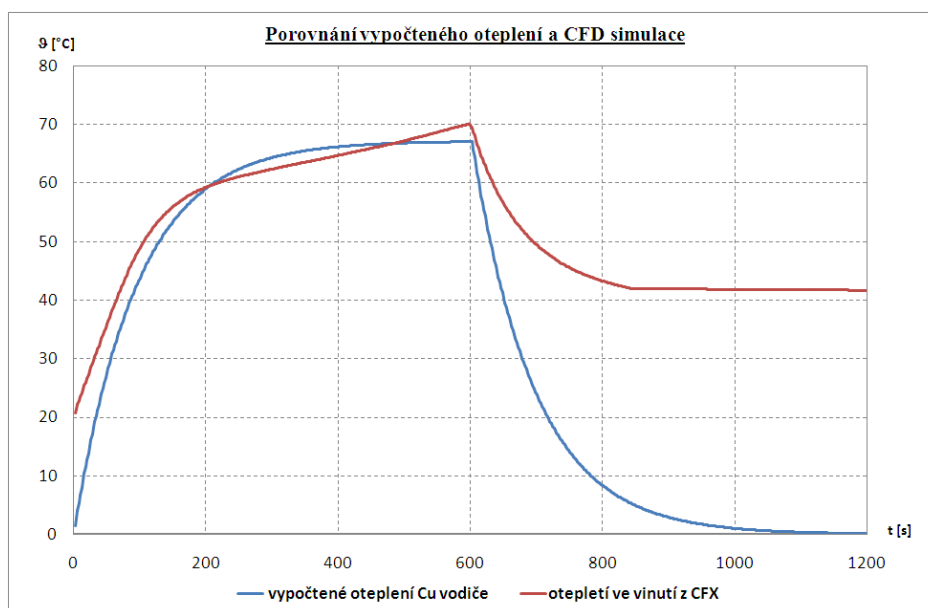
## 6.7 Vyhodnocení výsledků z ANSYS CFX (CFX – Post)

Prostředí CFX – Post je graficky velice blízké CFX – Pre. Je určen k zobrazení výsledků z výpočtu. CFX – Post umí zobrazovat výsledky v bodech, přímkách i rovinách.

Graf je vyexportován z CFX – Solver a je na něm vidět průběh teploty oleje v blízkosti zdroje ztrát, tedy v prostoru vinutí.

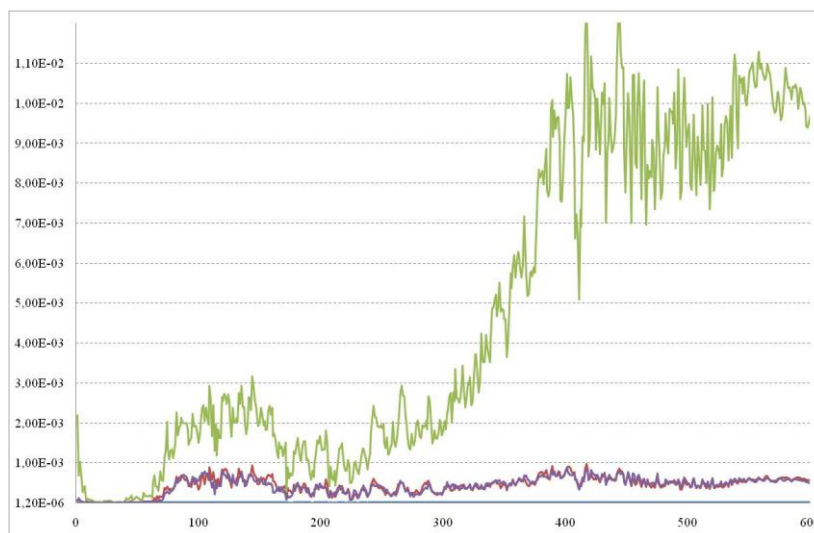


Obr. 6.16 Průběh oteplení vypočítaného CFD simulací



Obr. 6.17 Porovnání výsledků výpočtu a simulace

Jak ukazuje obrázek 6.17 výsledky se od určitého okamžiku liší, což způsobila chyba kroku v softwaru CFX. Výpočet byl nastaven na 100 iterací v jednom kroku s přípustnou chybou  $RMS = 1 \cdot 10^{-4}$ , ale jak ukazuje obrázek 6.18 od času 150 s chyba narůstá. Pro snížení této chyby by musela být iterace podstatně vyšší, ale to by se i zásadně zvýšila už tak dlouhá doba výpočtu.



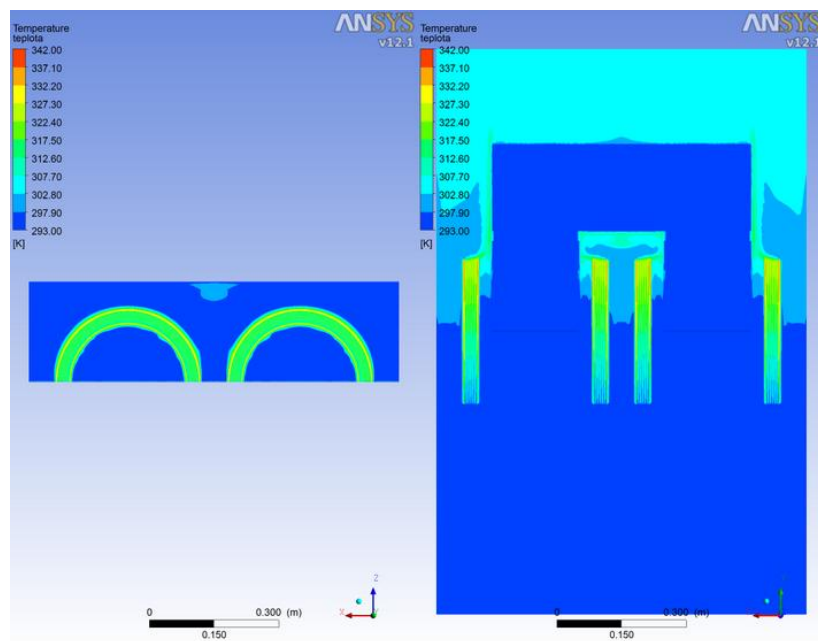
Obr. 6.18 Zachycení RMS chyby v CFX – Solver

Výsledky uvedené v této kapitole odpovídají výpočtu oteplení pro variantu zátěžného proudu tlumivky o velikosti  $I = 100 \text{ A}$  v režimu 10 minut zatížení proudem a následně 10 minut bez proudu (režim ochlazování).

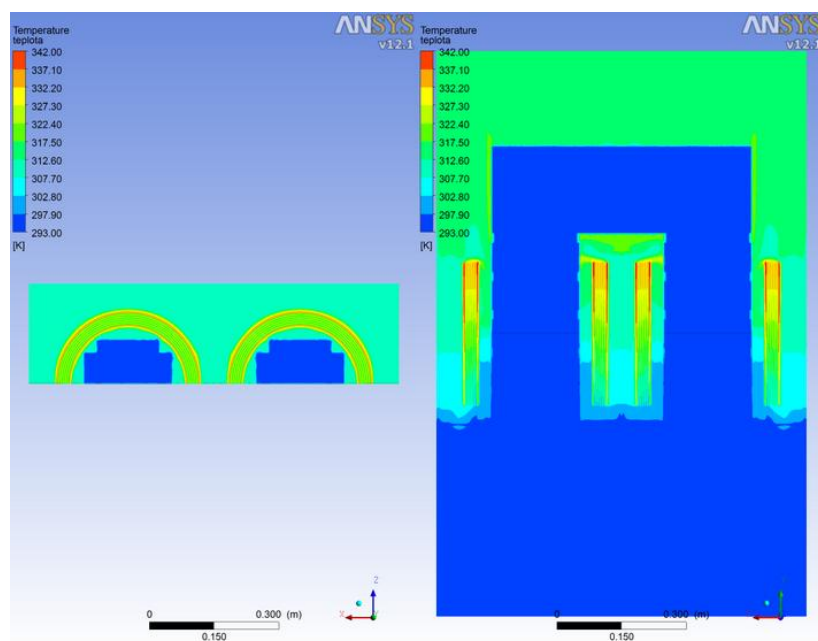
V další části této kapitoly jsou obrázky teploty rychlosti a tlaku tlumivky z CFX – Post. Vizuální interpretaci výsledků jsem prováděl na vygenerovaných rovinách, na kterých jsem zobrazoval kontury jednotlivých veličin, tedy teploty a tlaku. Rychlost proudění oleje je zachycena vektorově.

## Teplota

Průběh teploty pro 4 různé časy je zobrazen na následujících obrázcích. V prvních dvou obrázcích pro čas 5 a 10 minut je tlumivka zapnuta a teplota v ní narůstá. V oblasti vinutí (červená a oranžová barva) je teplota nejvyšší a olej v okolí se ohřívá.

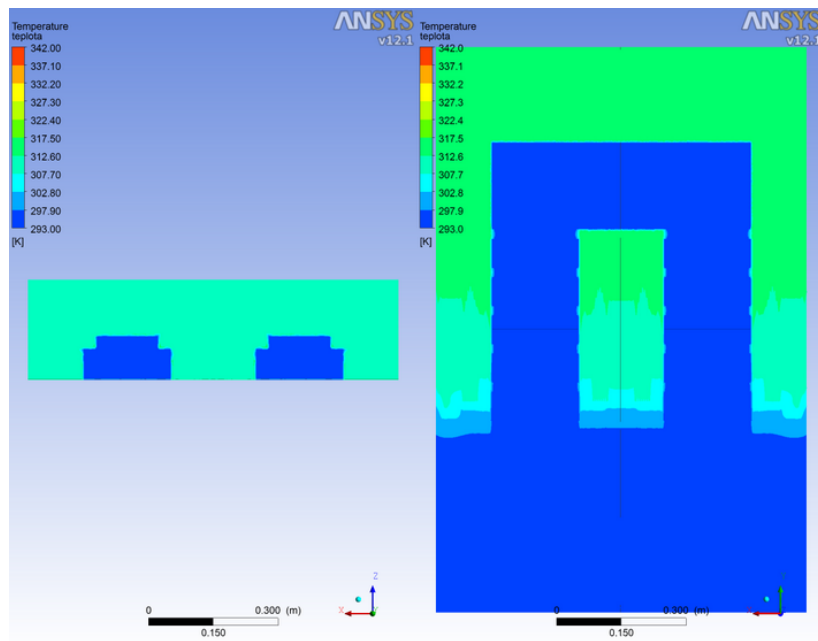


Obr. 6.19 Teplota v čase  $t = 300$  s

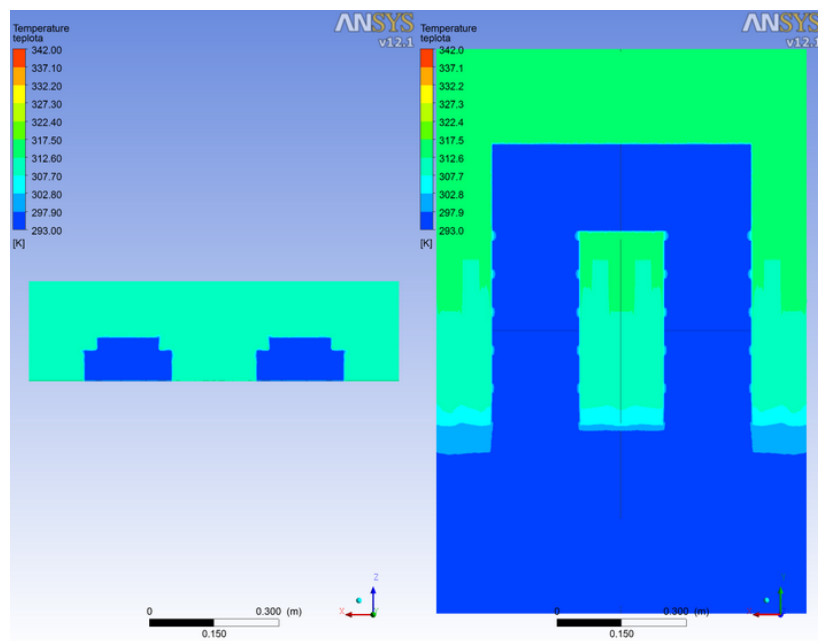


Obr. 6.20 Teplota v čase  $t = 600$  s

Další dva obrázky pro čas 15 a 20 minut jsou pro tlumivku ve vypnutém stavu. A jak vinutí, tak i olej chladne. Teplota oleje v blízkosti tlumivky neklesá již tak rychle, to je způsobeno již zmiňovanou chybou iterace.

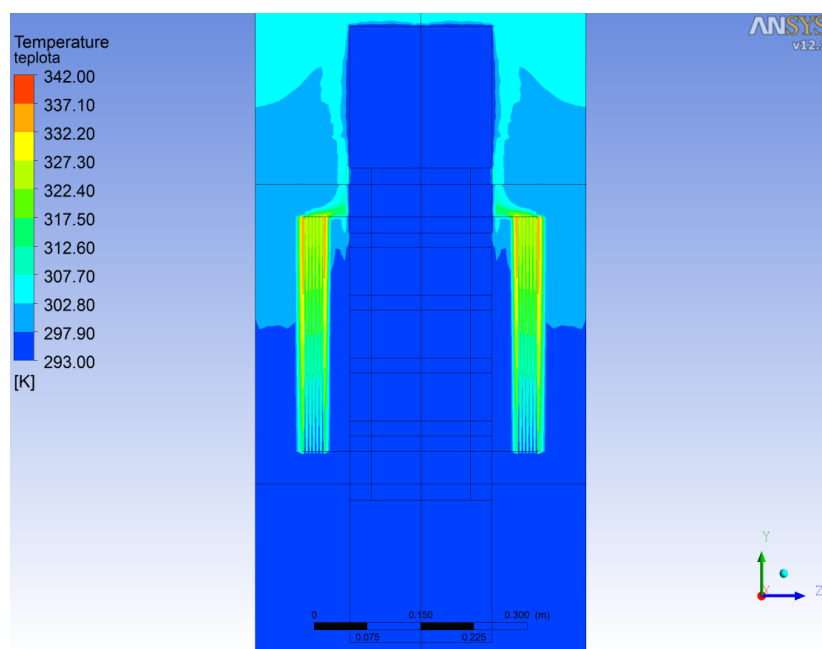


Obr. 6.21 Teplota v čase  $t = 900$  s

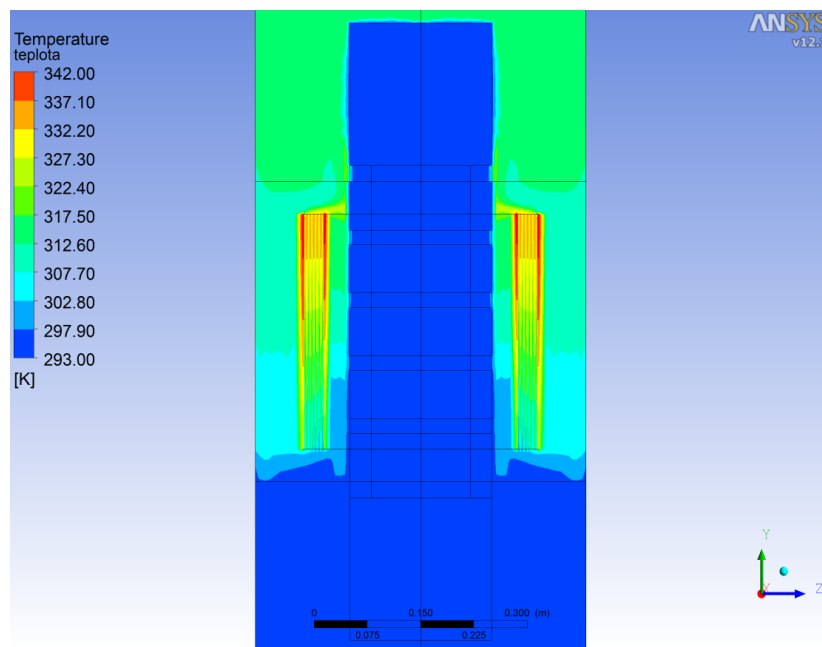


Obr. 6.22 Teplota v čase  $t = 1200$  s

Předchozí obrázky ukazují rozložení teploty v celé tlumivce, následující obrázky jsou pro shodné časy, ale jedná se o detail v blízkosti vinutí

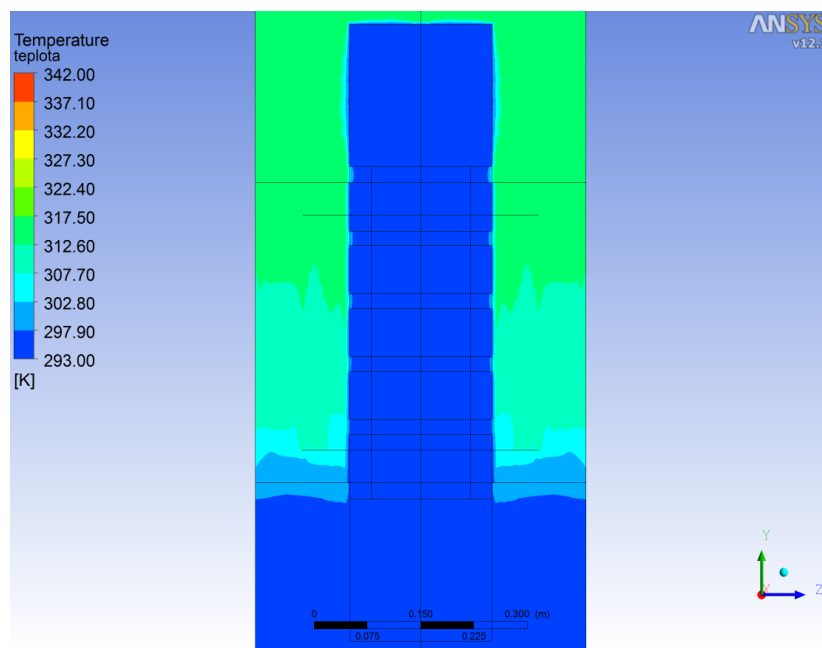


Obr. 6.23 Detail teploty v blízkosti vinutí v čase  $t = 300$  s

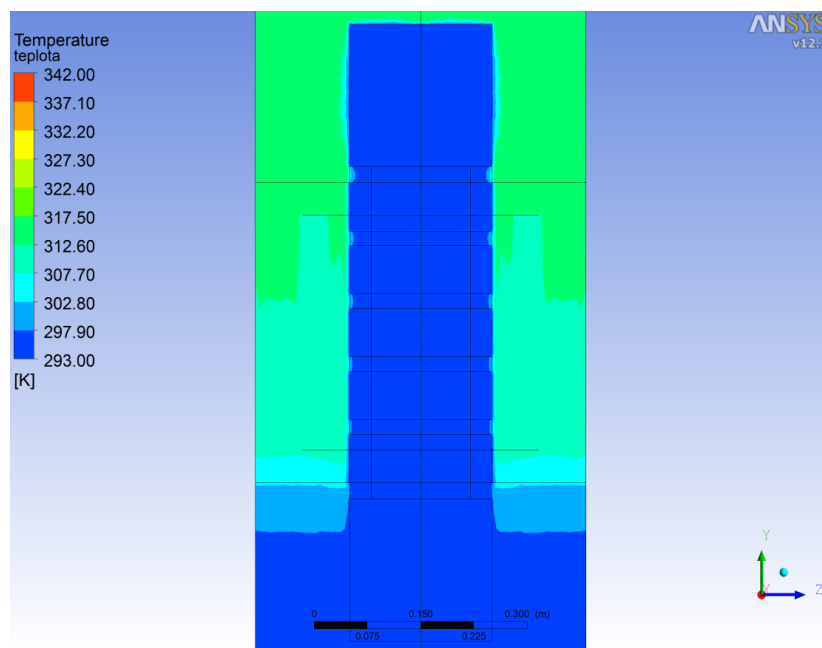


Obr. 6.24 Detail teploty v blízkosti vinutí v čase  $t = 600$  s





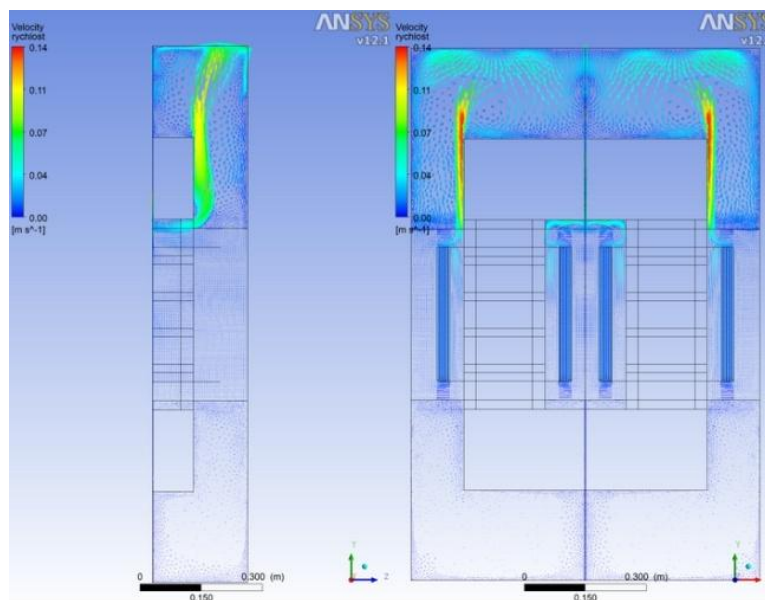
Obr. 6.25 Detail teploty v blízkosti vinutí v čase  $t = 900$  s



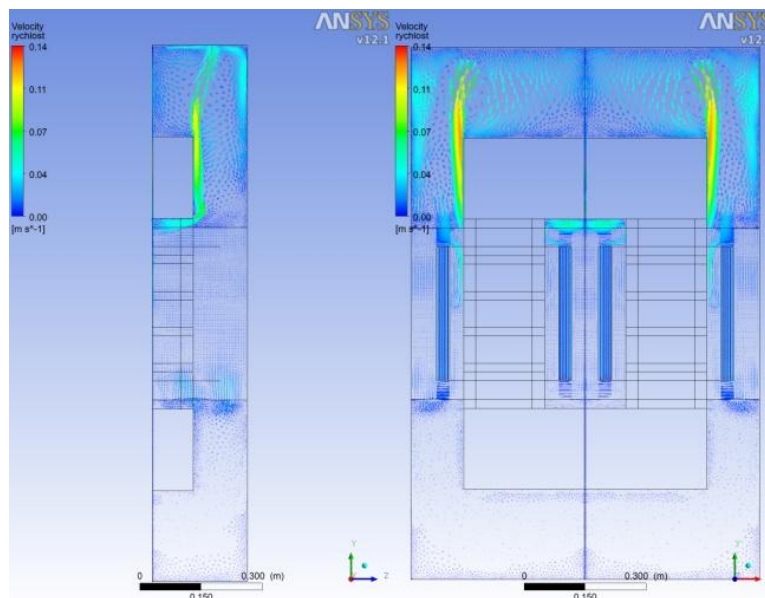
Obr. 6.26 Detail teploty v blízkosti vinutí v čase  $t = 1200$  s

## Vektory rychlosti

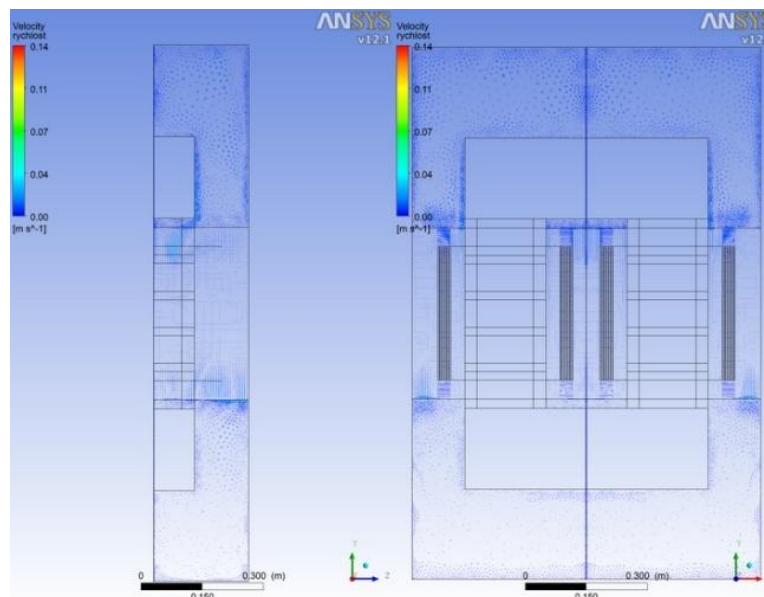
Při procházejícím proudu se vinutí zahřívá a předává teplo do oleje. Při zahřátí oleje klesá jeho viskozita, a zahřátý olej stoupá vzhůru. Obrázky 6.27 až 6.34 ukazují proudění, resp. vektory rychlosti oleje.



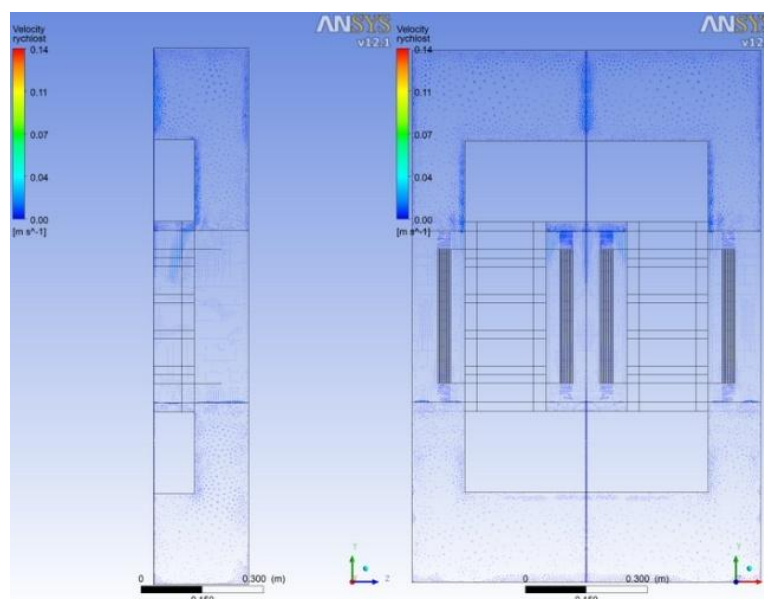
Obr. 6.27 Rychlost proudění oleje v čase  $t = 300$  s



Obr. 6.28 Rychlost proudění oleje v čase  $t = 600$  s

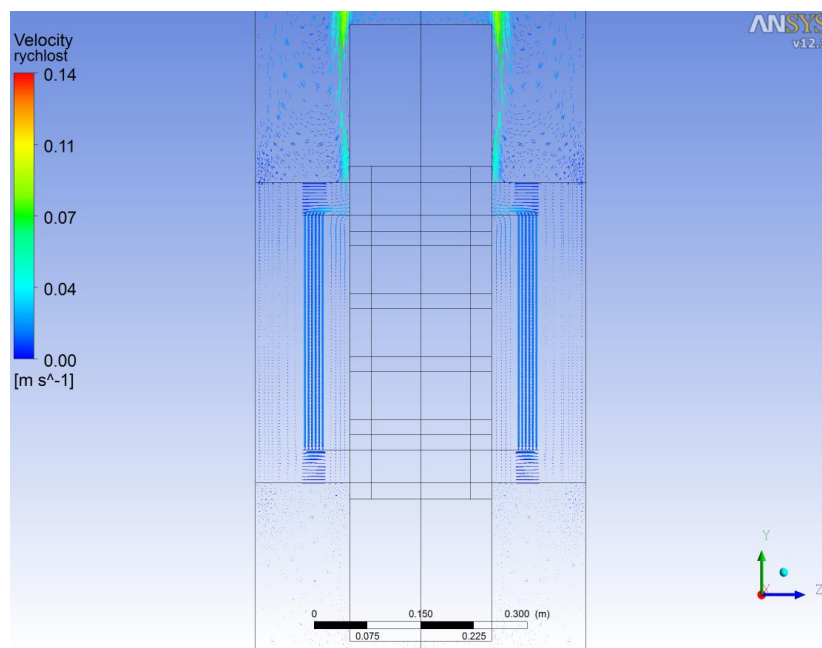


Obr. 6.29 Rychlost proudění oleje v čase  $t = 900$  s

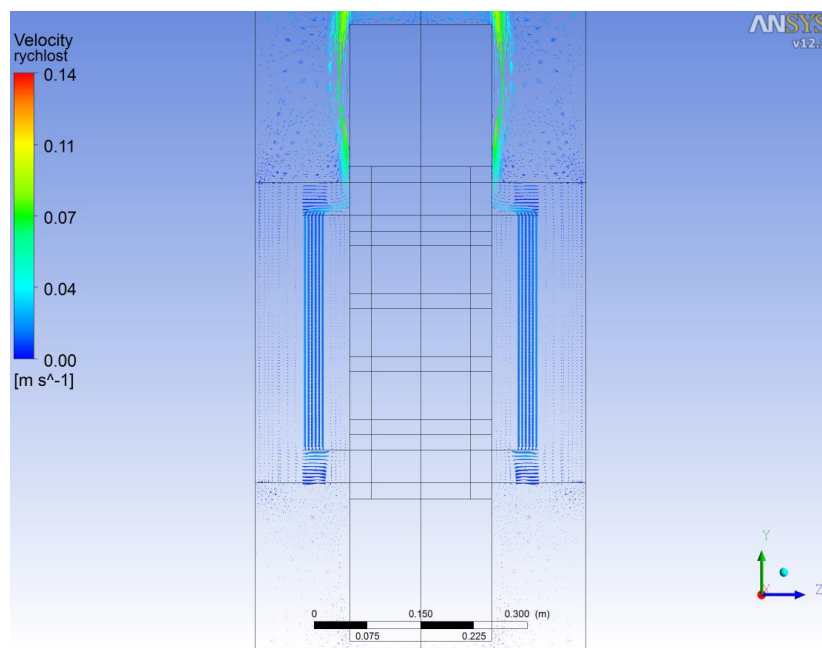


Obr. 6.30 Rychlost proudění oleje v čase  $t = 1200$  s

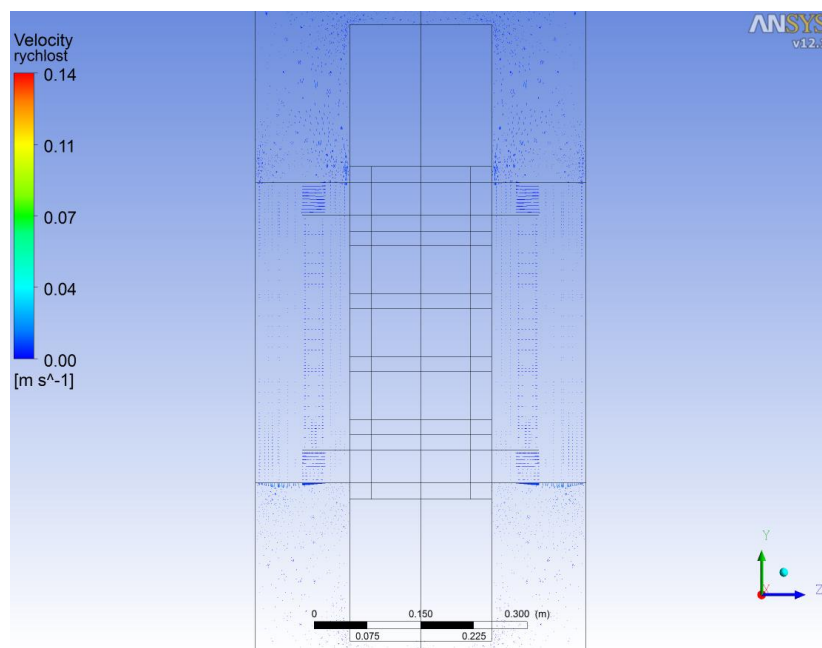
Vektory rychlosti oleje v blízkosti vinutí jsou zachyceny následující straně na obr 6.31 až obr. 6.34.



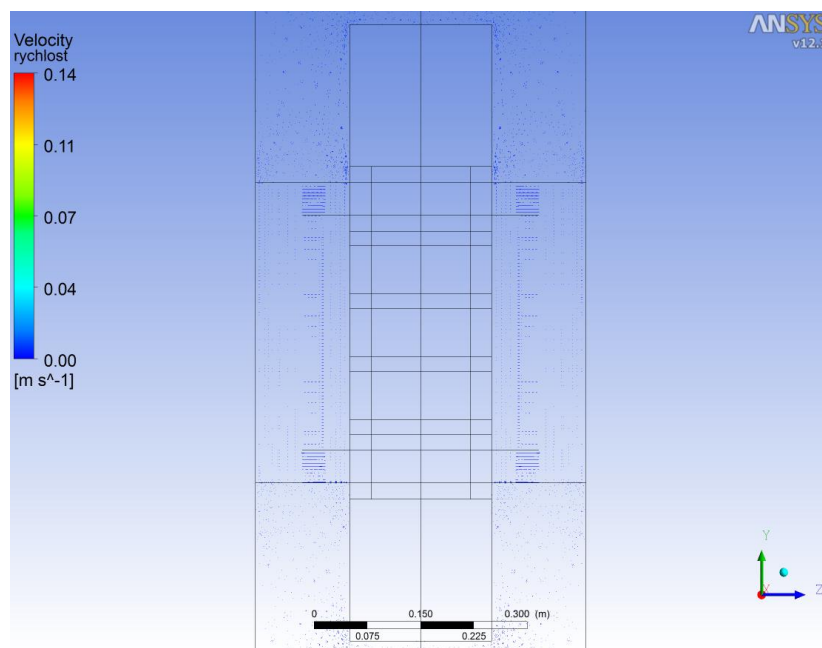
Obr. 6.31 Detail rychlosti proudění oleje v čase  $t = 300$  s



Obr. 6.32 Detail rychlosti proudění oleje v čase  $t = 600$  s



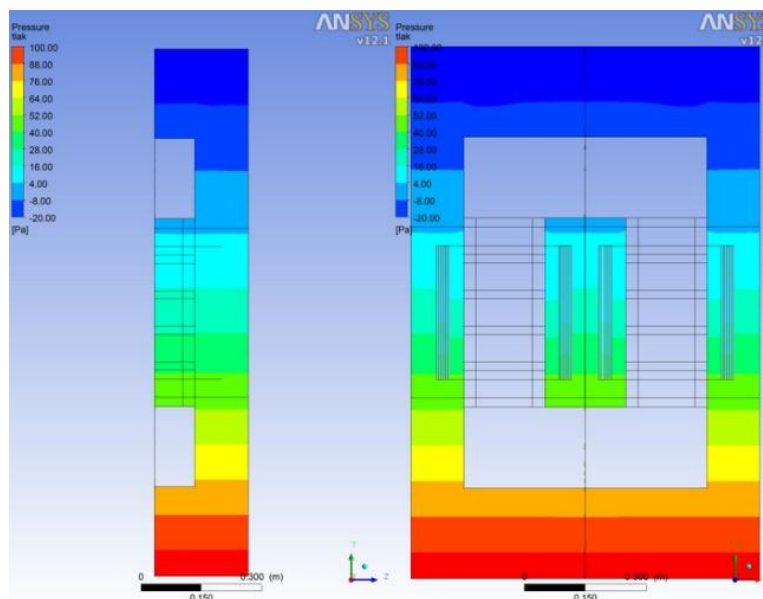
Obr. 6.33 Detail rychlosti proudění oleje v čase  $t = 900$  s



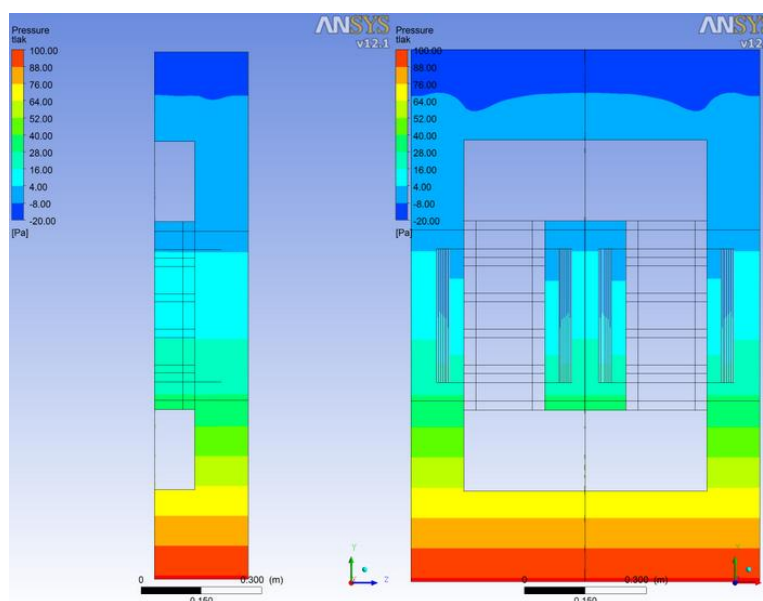
Obr. 6.34 Detail rychlosti proudění oleje v čase  $t = 1200$  s

## Tlak

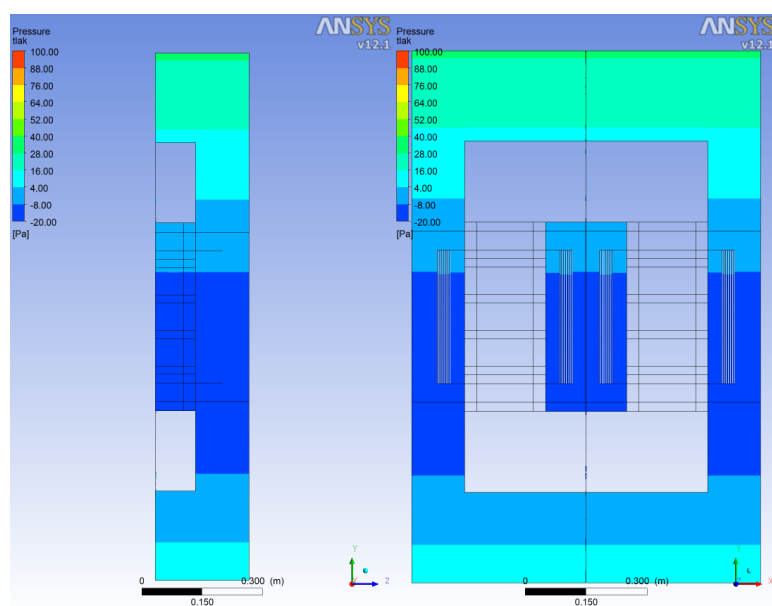
Zahříváný a proudící olej má tendenci se v nádobě rozpínat. Proto mají vysokonapěťové tlumivky expanzní nádoby. V mém případě je model hermeticky uzavřen, a proto dochází k určitému zkreslení výsledků. Systém výpočtu je postaven i na tom, že olej nemění s teplotou svoji hustotu.



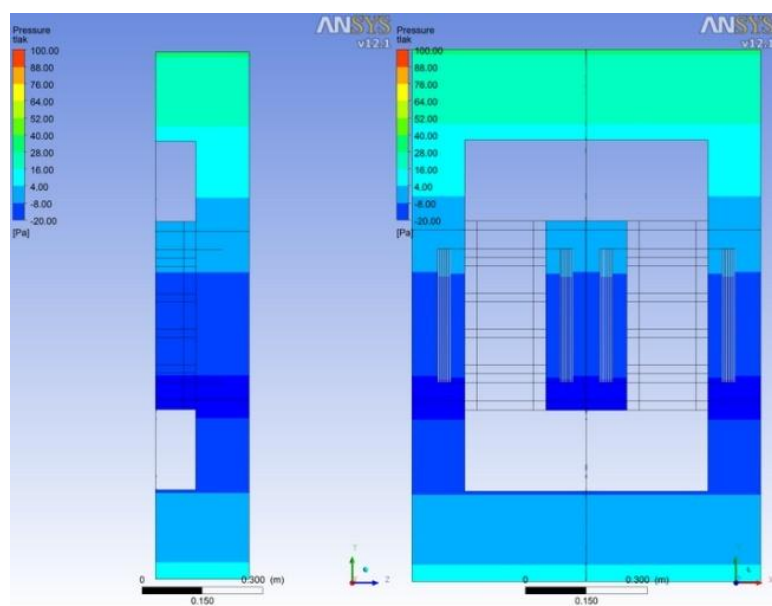
Obr. 6.35 Tlak v čase  $t = 300$  s



Obr. 6.36 Tlak v čase  $t = 600$  s

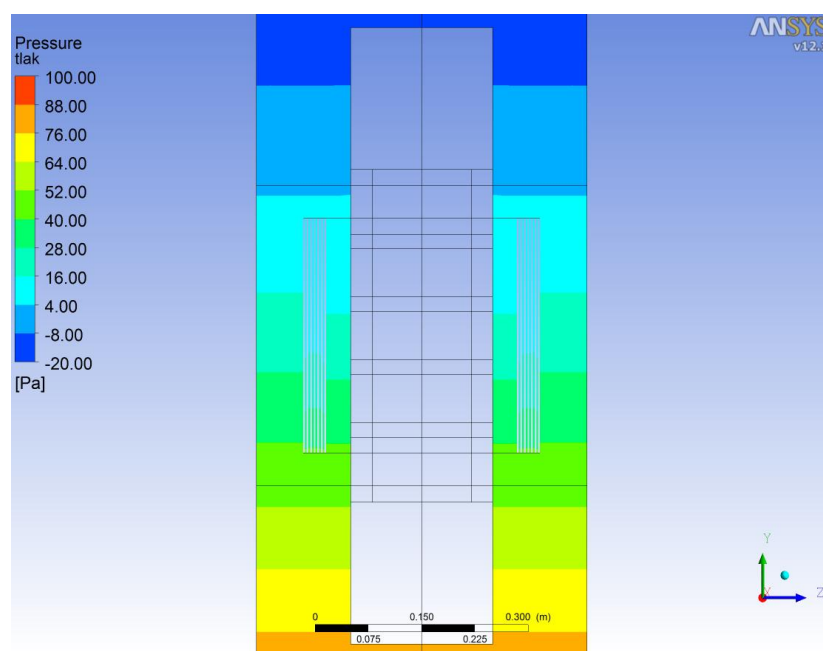


Obr. 6.37 Tlak v čase  $t = 900$  s

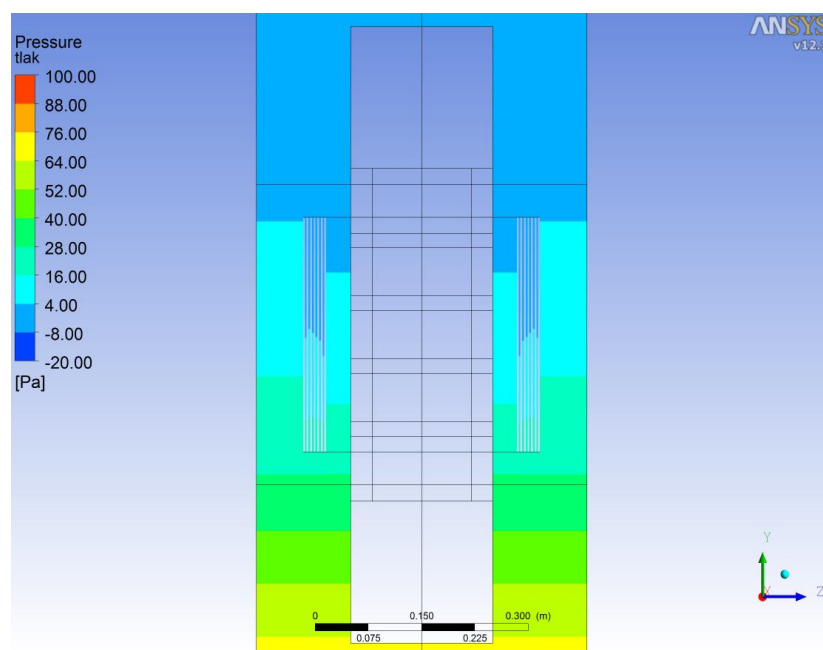


Obr. 6.38 Tlak v čase  $t = 1200$  s

Bližší pohled na tlak v tlumivce jsou vidět na následujících obrázcích. Tlak v prostoru vinutí a jádra.

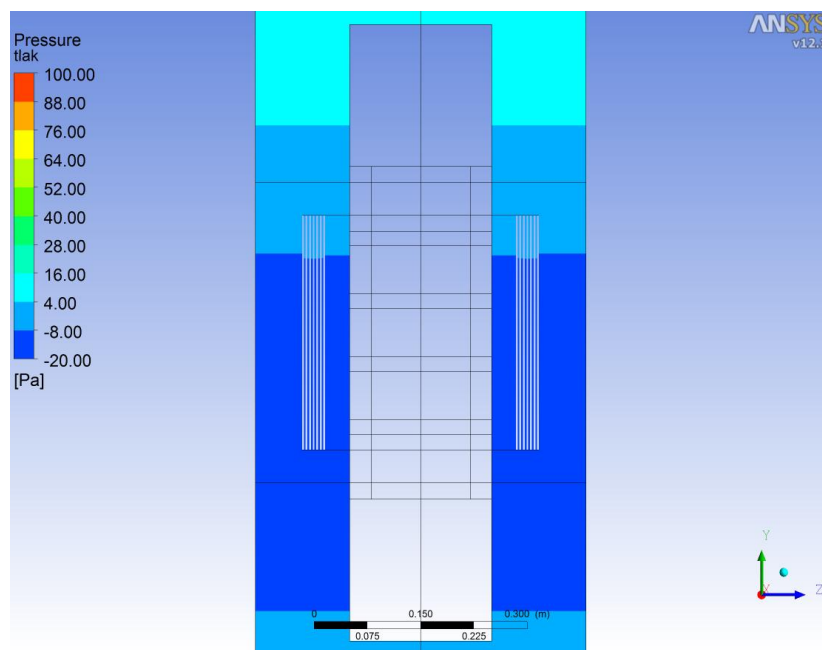


Obr. 6.39 Detail tlaku oleje v tlumivce v čase  $t = 300$  s

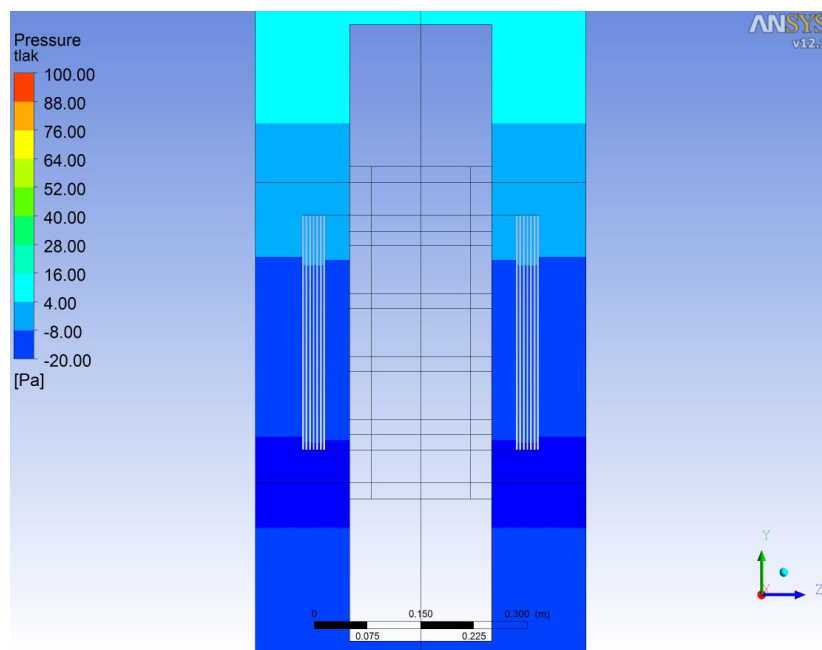


Obr. 6.40 Detail tlaku oleje v tlumivce v čase  $t = 600$  s





Obr. 6.41 Detail tlaku oleje v tlumivce v čase  $t = 900$  s



Obr. 6.42 Detail tlaku oleje v tlumivce v čase  $t = 1200$  s

V práci jsou uvedeny miniatury obrázků v CFX – Post. Obrázky v plném rozlišení jsou v příloze 5, na CD nosiči.

## 7 Závěr

Diplomová práce byla zaměřena na teplotní analýzu výkonového zařízení a to vysokonapěťové zhášecí tlumivky. Model vycházel z přibližných rozměrů vyráběné tlumivky. Teplotní analýzu jsem prováděl v simulačním programu ANSYS / CFX určeného především pro modelování proudění.

Samotná příprava se skládala z několika kroků. Vytvoření modelu v softwaru SolidWorks. V softwaru ANSYS Workbench jsem model připravoval pro další analýzu, tzn. pro vytvoření výpočetní sítě. Dále také pojmenování styčných ploch pro tzv. interface, které jsou určující pro software CFX – Pre.

Výpočetní síť v prostoru vinutí musí být velice jemná pro zachycení přirozené konvekce, protože v tomto prostoru je veliký gradient teploty. Vzdálenější okolí je vysítováno volnou sítí, tzn. většími elementy, protože zde už není změna teploty tak velká. Správné rozvržení a velikost sítě je podstatnou otázkou při zpracování modelu. Ale i při zvětšení a ušetření elementů vytvoření sítě bylo časově náročné.

Výsledky z CFX se v první části simulace blíží velice přesně teoretickému základu, ale v druhé polovině je už výpočet zkreslen z důvodu narůstající chyby při malém počtu iterací. Zpřesnění výsledků lze dosáhnout jednak jejich zvýšením a jednak zjemněním výpočetní sítě. Ale tyto kroky jsou však velice náročné na hardwarové vybavení a dobu vlastního výpočtu. Doba výpočtu analýzy jenž je uvedena v práci činila přibližně 10 dní na počítači s 4 procesorovou jednotkou a 8GB operační pamětí.

Řešení fyzikálně technických úkolů s pomocí softwaru jako je například ANSYS Workbench, nebo ANSYS / CFX je i při moderním výpočetním hardwaru velice časově náročné.

## 8 Literatura

- [1] Draxler, K. a spol.: Magnetické prvky a měření, ČVUT Praha 1994; 276 stran; ISBN 80-01-01080-5
- [2] Faktor, Z.: Transformátory a cívky; BEN Praha 1999; 398 stran; ISBN 80-86056-49-X
- [3] Hejzlar, R.: Sdílení tepla; ČVUT Praha 2004; 186 stran; ISBN 80-01-02974-3
- [4] Hradílek, Z.: Elektrotepelná technika; VŠB – TU Ostrava; 237 stran; ISBN 80-7078-323-0
- [5] Wasyluk, R.: Elektrotechnologie pro školu a praxi, Scientia Praha 2004; 366 stran; ISBN 80-7183-306-1
- [6] ESB Elektrické stroje: Regenerace transformátorových a turbínových olejů. 5-12-2008 [online], [Cit. 12-1-2010]. Dostupný na WWW: <http://www.esb-bez.cz/download/regenerace-transformatorovych-a-turbinovych-oleju.pdf>
- [7] Internetové stránky výrobce EKOFLUID, s.r.o. [online], [Cit. 12-1-2010]. Dostupný na WWW: <http://www.ekofluid.sk/13.html>
- [8] Blejchař, T.: Návod do cvičení “Modelování proudění” – CFX; VŠB – TU Ostrava 2009; [online], [Cit 4-4-2010], Dostupný na WWW: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Blejchar-CFX.pdf>
- [9] Internetové stránky výrobce ABB, s.r.o. [online], [Cit. 8-2-2010]. Dostupný na WWW: <http://www.abb.cz/product/cz/9AAC30200100.aspx?country=CZ>
- [10] Internetové stránky výrobce Ege, s.r.o. [online], [Cit. 8-2-2010]. Dostupný na WWW: <http://www.ege.cz/index.php?docid=276&lang=CZ>
- [11] Kozubková, M.: Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX, VŠB – TU Ostrava 2008; [online], [Cit 4-4-2010], Dostupný na WWW: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>

## **9 Seznam příloh**

### **Příloha 1**

Model tlumivky ze SolidWorks

### **Příloha 2**

Model tlumivky z ANSYS Workbench

### **Příloha 3**

Vysíťovaný model

### **Příloha 4**

Graf porovnávací průběh vypočtené a odsimulované teploty

### **Příloha 5**

Obsah CD: Obrázky rozložení teploty, rychlosti a tlaku v plném rozlišení.